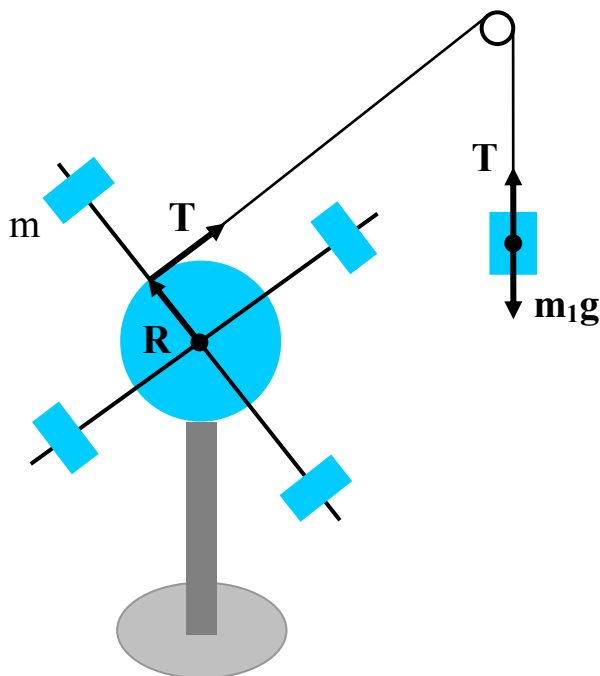


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ**  
**ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени В.Н. КАРАЗИНА**

**Савченко Е. М.**

**ФИЗИКА. ПРАКТИКУМ**  
**Методические указания**



**ХАРЬКОВ 2014**

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## МЕХАНИКА

### ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 ДИНАМИКА ПОСТУПАТЕЛЬНОГО И ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Основные величины, характеризующие движение тела:

- радиус-вектор  $\vec{r}$  определяет положение тела в пространстве в любой момент времени;
- скорость  $\vec{v}$  показывает, как быстро меняется положение тела. Скорость равна первой производной радиус-вектора по времени  $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt}$ ;
- ускорение  $\vec{a}$  характеризует быстроту изменения скорости (возрастания или убывания). Ускорение равно первой производной скорости по времени (второй производной радиус-вектора)

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} \quad (1.1)$$

При *поступательном движении* все точки тела движутся совершенно одинаково, т.е. в любой момент времени скорости и ускорения всех точек равны.

*Вращательное движение* – это движение, при котором все точки тела движутся по окружностям, центры которых лежат на одной прямой – оси вращения. При таком движении разные точки тела за одинаковое время проходят разные пути (значит, их скорости и ускорение разные), но поворачиваются на одинаковые углы  $\varphi$ . Поэтому для описания вращения вводят угловые характеристики:

– угловое перемещение  $\vec{\varphi}$  ;

– угловая скорость  $\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}$  ; (1.2)

– угловое ускорение  $\vec{\beta} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}$  . (1.3)

Векторы  $\vec{\varphi}$ ,  $\vec{\omega}$  и  $\vec{\beta}$  аксиальные и направлены вдоль оси вращения.

*Кинематическое уравнение движения* (уравнение, связывающие основные характеристики движения тела) для поступательного и вращательного движения записывается аналогично:

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{\vec{a} t^2}{2}; \quad (1.4)$$

$$\vec{\varphi} = \vec{\varphi}_0 + \vec{\omega}_0 t + \frac{\vec{\beta} t^2}{2}. \quad (1.5)$$

Зная уравнение движения и начальные условия (координаты и скорость в начальный момент времени) можно определить положение и скорость тела в любой момент времени – это основная задача механики.

Если тело движется под действием сил, то возникает вопрос о связи силы и ускорения тела. Ответ на него дает *второй закон Ньютона – динамическое уравнение движения*.

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (1.6)$$

где  $\vec{F}$  - суммарная сила, действующая на тело;  
 $m$  - масса тела.

Если под действием сил тело вращается, то динамическое уравнение движения выглядит следующим образом

$$\vec{M} = I\vec{\beta}, \quad (1.7)$$

где  $\vec{M}$  - суммарный момент сил  $\vec{M} = [\vec{r}\vec{F}]$ ;

$\vec{r}$  - радиус-вектор точки приложения силы;

$I$  - момент инерции, характеризующий инертность тела при вращательном движении.

Если представить тело как совокупность малых объёмов  $\Delta V$ , каждый из которых считать материальной точкой массой  $\Delta m_i$ , то *момент инерции одной материальной точки*, вращающейся вокруг оси, по определению равен:

$$\Delta I_i = \Delta m_i r_i^2, \quad (1.8)$$

где  $r_i$  - расстояние от данной точки до оси вращения.

*Момент инерции всего вращающегося тела* буде равен сумме моментов инерции точек, из которых оно состоит:

$$I = \sum_i \Delta I_i = \sum_i \Delta m_i r_i^2 \quad (1.9)$$

Момент инерции тела зависит от положения оси вращения.

## **Выполнение работы**

**Цель работы** – определить момент инерции  $I$  маятника Обербека.

### **Описание установки**

Этот маятник представляет собой систему двух пересекающихся стержней, на которых закреплены четыре груза  $m$ . Система стержней с

грузами приводится во вращение нитью, к другому концу которой прикреплен падающий груз  $m_1$  (рис. 1.1).

На груз  $m_1$  действуют две силы: сила тяжести  $m_1 \vec{g}$  и сила натяжения нити  $\vec{T}$ . Груз движется поступательно. Динамическое уравнение движения этого груза тогда имеет вид:

$$m_1 \vec{g} + \vec{T} = m_1 \vec{a} . \quad (1.10)$$

Силы направлены в противоположные стороны, поэтому можно написать:

$$m_1 g - T = m_1 a . \quad (1.11)$$

Кинематическое уравнение движения:

$$h = \frac{at^2}{2} , \quad (1.12)$$

принимая, что в начальный момент  $v_0 = 0$ ,  $r_0 = 0$ ,  $r = h$ .

Систему стержней с грузами приводит во вращение сила натяжения  $T$ . Момент силы равен:

$$\vec{M} = [\vec{R}\vec{T}] \quad (1.13)$$

где  $R$  - радиус шкива, на который намотана нить (см. рис. 1.1).

Так как  $\vec{R} \perp \vec{T}$ , модуль момента силы натяжения равен:

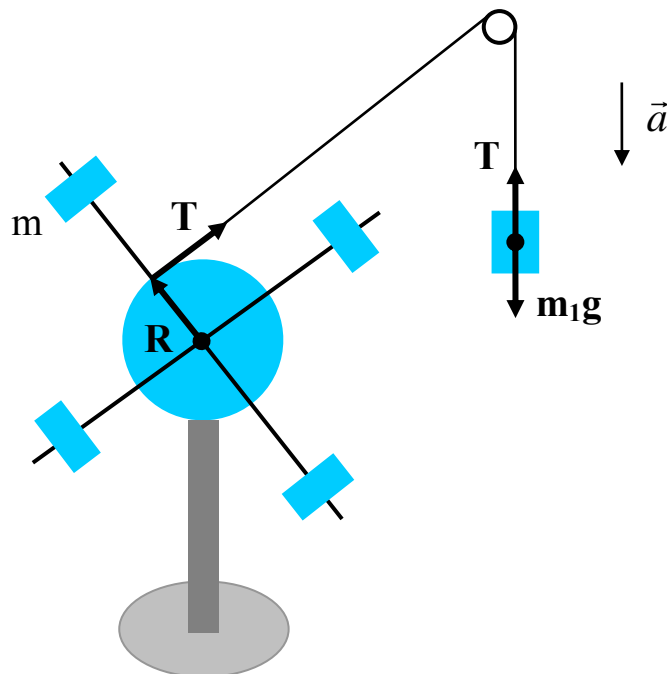


Рис. 1.1

$$M = RT \sin \alpha = RT \quad (1.14)$$

Динамическое уравнение движения вращающейся системы на основании (1.7) имеет вид:

$$RT = I\beta \quad (1.15)$$

где  $I$  – момент инерции системы.

Угловое ускорение  $\vec{\beta}$  вращающейся системы и ускорение груза  $\vec{a}$ , связаны соотношением

$$\beta = a/R \quad (1.16)$$

Таким образом, для нахождения искомой величины – момента инерции  $I$  имеем систему уравнений

$$\begin{cases} m_1 g - T = m_1 a \\ RT = I\beta \\ \beta = a/R \\ a = \frac{2h}{t^2} \end{cases} \quad (1.17)$$

Решая её, найдем момент инерции  $I$ :

$$I = \frac{RT}{\beta} = \frac{RT}{a} R = \frac{R^2 t^2}{2h} T \quad (1.18)$$

$$T = m_1 (g - a) = m_1 \left( g - \frac{2h}{t^2} \right)$$

Тогда

$$I = \frac{R^2 t^2 m_1}{2h} \left( g - \frac{2h}{t^2} \right) \quad (1.19)$$

Окончательно

$$I = \frac{m_1 R^2 (gt^2 - 2h)}{2h} \quad (1.20)$$

Т. е. момент инерции определяется через параметры движения падающего груза  $m_1$ : высоту его падения  $h$  и время падения  $t$ .

С другой стороны, момент инерции системы равен сумме моментов инерции стержней и грузов

$$I = 2I_{\bar{n}\bar{o}.} + 4I_{\bar{a}\bar{d}.} = 2 \frac{m_0 l^2}{12} + 4mx^2 \quad (1.21)$$

где  $l$  – длина стержня;

$m_0$  – масса стержня;

$x$  – расстояние от середины груза  $m$  до оси вращения.

Расчет момента инерции одного стержня приведен в *Дополнении*.

### Ход работы

1. Для нескольких расстояний  $x$  от грузов  $m$  до оси вращения, рассчитать момент инерции  $I$  по формуле (1.21). Построить график зависимости  $I(x)$ .

*Внимание: все величины до начала расчета перевести в систему СИ.*

2. Закрепив грузы на стержнях на заданном расстоянии  $x$ , наматывают нить на шкив. При этом груз  $m_1$  поднимается на некоторую высоту  $h$ . Измеряют её.
3. Отпускают груз  $m_1$  и измеряют время его падения  $t$ . Опыт повторяют пять раз. Определяют среднее время и по формуле (1.20) рассчитывают момент инерции.
4. Сравнить значения  $I$ , рассчитанные по формулам (1.21) и (1.20).

### **Дополнение**

Найдем момент инерции одного стержня, вращающегося вокруг оси  $OO'$ , проходящей через его середину.

Разобьем стержень на малые объемы  $\Delta V$  (выделен на рис.1.2). Масса каждого из них равна

$$\Delta m_i = \rho \Delta V_i \quad (1.22)$$

где  $\rho$  – плотность материала стержня.

$$\Delta V_i = S \Delta r_i \rightarrow \Delta m_i = \rho S \Delta r_i \quad (1.23)$$

Тогда

$$\Delta I_i = \Delta m_i r_i^2 = \rho S \Delta r_i r_i^2 \quad (1.24)$$

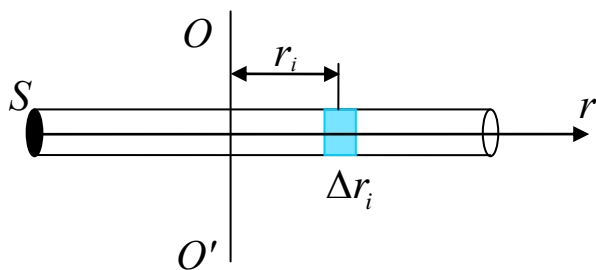


Рис. 1.2

Момент инерции всего стержня равен сумме моментов инерции всех таких объемов. Если число  $n$  объемов бесконечно велико, то суммирование заменяется интегрированием:

$$\begin{aligned} I &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_i^n \Delta I_i = 2 \int_0^{l/2} \rho S r^2 dr = 2 \rho S \int_0^{l/2} r^2 dr = \\ &= 2 \rho S \frac{r^3}{3} \Big|_0^{l/2} = \frac{2 \rho S}{3} r^3 \Big|_0^{l/2} = \frac{2 \rho S l^3}{3 \cdot 8} = \frac{\rho S l^3}{12} \end{aligned} \quad (1.25)$$

Учитывая, что масса всего стержня  $m = \rho V = \rho S l$ , окончательно имеем

$$I = \frac{m l^2}{12} \quad (1.26)$$

### **Контрольные вопросы**

1. Поступательное и вращательное движение тела – дать определение.
2. Основные характеристики движения тела – назвать, дать определение.
3. Величины, характеризующие вращательное движение – дать определение.
4. Кинематическое и динамическое уравнение поступательного движения – записать, пояснить.
5. Сила и момент силы. Второй закон Ньютона для поступательного и вращательного движения.
6. Момент инерции – определение, единицы измерения. Зависит ли момент инерции от положения оси вращения? Поясните.
7. \*Выведите формулу для определения момента инерции маятника Обербека.
8. \* Рассчитайте момент инерции вращающегося стержня.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**

### **УПРУГИЕ СВОЙСТВА ТЕЛ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОДУЛЯ ЮНГА**

Если внешние силы деформируют тело, в нем возникают силы, препятствующие деформации. Это силы упругости. Механизм их возникновения следующий. Любое тело состоит из частиц (атомов, ионов, молекул), которые находятся в положении равновесия в недеформированном теле. Равновесие достигается за счет баланса действующих между частицами сил притяжения и отталкивания электрической природы, которые зависят от расстояния. На рис. 2.1 приведена зависимость потенциальной энергии взаимодействия ( $W$ ) атомов или молекул от расстояния между ними ( $r$ ).

Область  $W < 0$  соответствует притяжению,  $W > 0$  отталкиванию между частицами. Минимум функции при  $r = r_0$  отвечает равновесию. Частицы совершают колебательные движения вблизи  $r_0$  (“дна потенциальной ямы”).

Если равновесие нарушается, например, при действии внешней силы уменьшаются или увеличиваются расстояния между частицами, силы взаимодействия между ними стремятся равновесие восстановить.

На больших расстояниях ( $r$  велико) частицы слабо взаимодействуют ( $W \rightarrow 0$ ). При сближении частиц ( $r > r_0$ )  $W$  растет по абсолютной величине (оставаясь отрицательной) - преобладают силы притяжения.

Если  $r$  становится меньше  $r_0$ , возникают и начинают вырастать силы отталкивания.

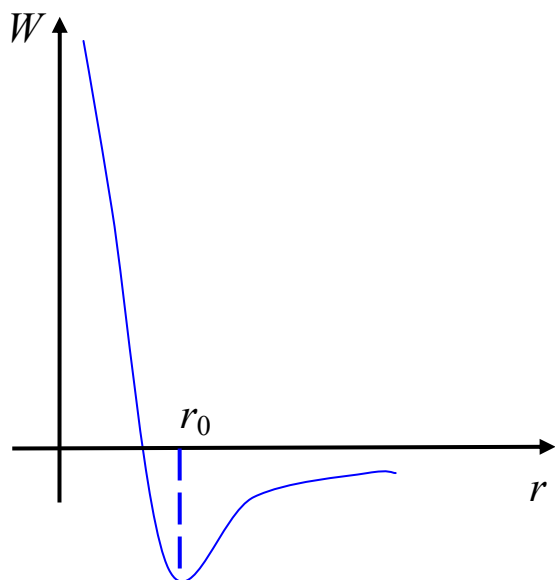


Рис. 2.1

Макроскопически наблюдается стремление тел (материалов) сохранять свой объём (для твердых тел и форму) при действии внешних сил. Чем больше деформация – тем больше возникающая в теле сила упругости. Это утверждение, справедливое для *малых упругих* деформаций, выражает *закон Гука*. Конкретная формула для закона Гука зависит от конкретного вида деформации. Деформации одностороннего расстояния (сжатия) и сдвига – однородные. Дефор-

мации кручения и изгиба - неоднородные.

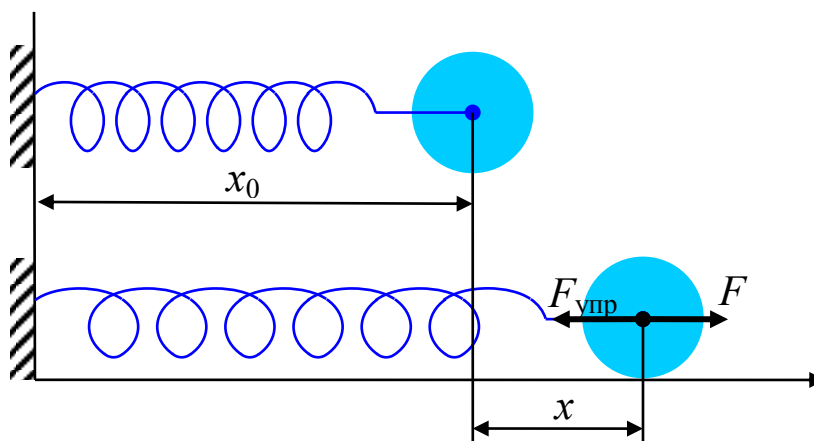
### Деформация растяжения пружины

Сила  $\vec{F}$  растягивает пружину (рис. 2.2). В пружине возникает сила упругости

$$F_{\text{упр}} = -kx, \quad (2.1)$$

где  $k$  – жесткость пружины.

Одно-  
стороннее  
растя-  
жение  
ня



сто-  
растя-  
стерж-

Рис. 2.2



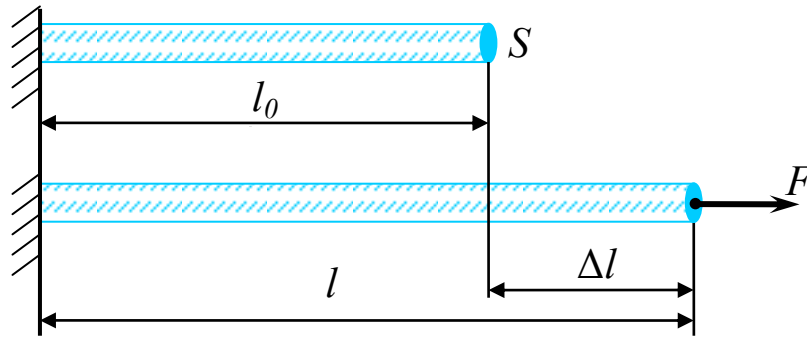


Рис. 2.3

Сила  $\vec{F}$  растягивает стержень, противоположный конец которого закреплен (рис. 2.3). К каждой единице площади сечения  $S$  стержня приложено напряжение  $\sigma = \frac{F}{S}$ . Деформация характеризуется абсолютным  $\Delta l = l - l_0$  и относительным удлинением  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$  (деформацией).

Закон Гука в этом случае имеет вид:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.2)$$

где  $E$  – модуль Юнга, характеризующий упругие свойства материала стержня.

### Деформация сдвига

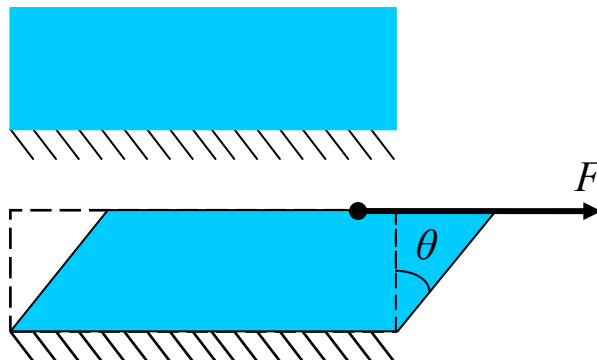


Рис. 2.4

Сила  $\vec{F}$  приложена к верхней грани стержня прямоугольного сечения, нижняя грань которого закреплена. При сдвиге объем практически не меняется. Деформация характеризуется углом сдвига (в радианах).

Закон Гука:

$$\sigma \equiv \tau = G\theta, \quad (2.3)$$

где  $G$  – модуль сдвига.

## Деформация кручения

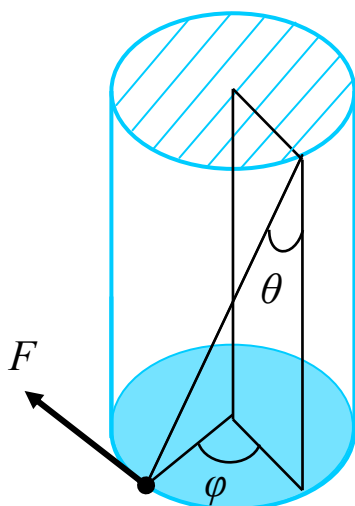


Рис. 2.5

Сила  $\vec{F}$  приложена к нижнему концу стержня, противоположный (на рисунке заштрихованный) конец которого закреплен. Сила создает вращающий момент  $\vec{M}$ . Деформация характеризуется углом закручивания  $\varphi$ .

Закон Гука:

$$M = D\varphi, \quad (2.4)$$

где  $D$  – модуль кручения, зависит не только от материала, но и от размеров и формы тела.

Как отмечалось, закон Гука справедлив при *малых упругих деформациях*. При больших внешних силах деформации становятся неупругими (пластичными) – после снятия нагрузки тело не восстанавливает свои форму и объем.

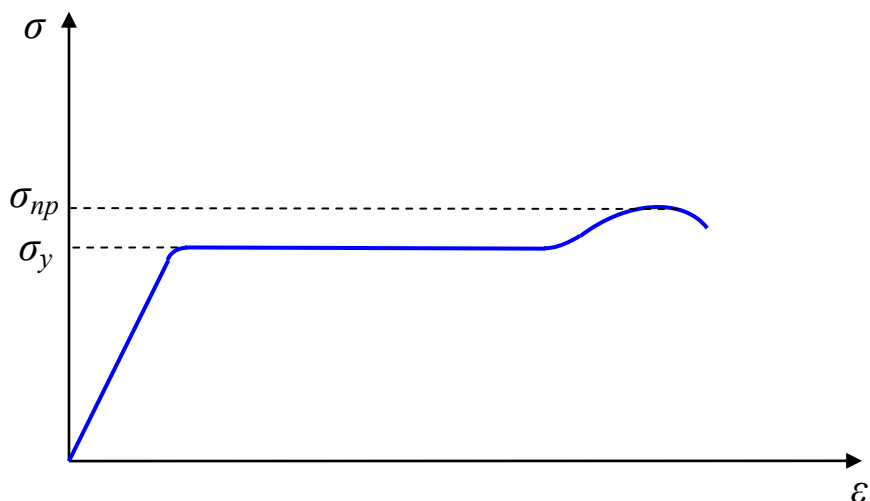


Рис. 2.6

На рис. 2.6 приведена зависимость  $\sigma(\varepsilon)$  в случае растяжения однородного стержня. Линейный участок соответствует закону Гука лишь для малых деформаций. Значения напряжения  $\sigma_y$ , выше которого возникают остаточные деформации, называют пределом упругости. После снятия нагрузки тело будет обладать ненулевой деформацией. На горизонтальном участке графика (рис 2.6) деформация возрастает без увеличения приложенного напряжения – тело «течет». Это область пластических деформаций. Далее, после небольшого роста напряжения, наступает предел прочности  $\sigma_{\text{пр}}$ , за которым следует разрыв стержня.

В работе изучается деформация одностороннего растяжения металлической проволоки.

## **Выполнение работы**

**Цель работы** – определение модуля Юнга, характеризующего упругие свойства материала, из которого изготовлена проволока. Согласно (2.2) модуль Юнга  $E$  равен

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon},$$

откуда следует, что модуль Юнга равен напряжению, которое нужно приложить к телу, чтобы его относительная деформация стала равной единице. Это означает, что длина образца увеличилась бы в 2 раза. При таких больших деформациях, однако, закон Гука не выполняется.

Для определения модуля Юнга необходимо получить зависимость  $\sigma(\varepsilon)$ , построить график этой зависимости, определить область выполнения закона Гука и найти  $E$ , пользуясь выражением (2.2) для соответствующего линейного участка графика.

### **Описание установки.**

Исследуемая проволока (1) (рис. 2.7) закреплена на одном из концов (2). Второй конец ее (3) прикреплен к рычагу (4), который поворачивается вокруг горизонтальной оси (5) перпендикулярной плоскости рисунка, при этом растягивая проволоку. Изменять приложенное к проволоке растягивающее напряжение  $\sigma$  можно, изменяя положение груза (6) на рычаге. Абсолютная деформация (удлинение  $\Delta l$ ) проволоки измеряется чувствительным датчиком деформации (7).

Опытным путем было установлено, что перемещение груза на одно большое деление шкалы рычага соответствует изменению растягивающей силы  $F$  на  $0,55 \text{ Н}$ . Напряжение можно определить из соотношения

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{0,55 * N}{\pi r^2}, \quad (2.5)$$

где  $N$  – число делений рычага,  $r$  – радиус сечения проволоки.

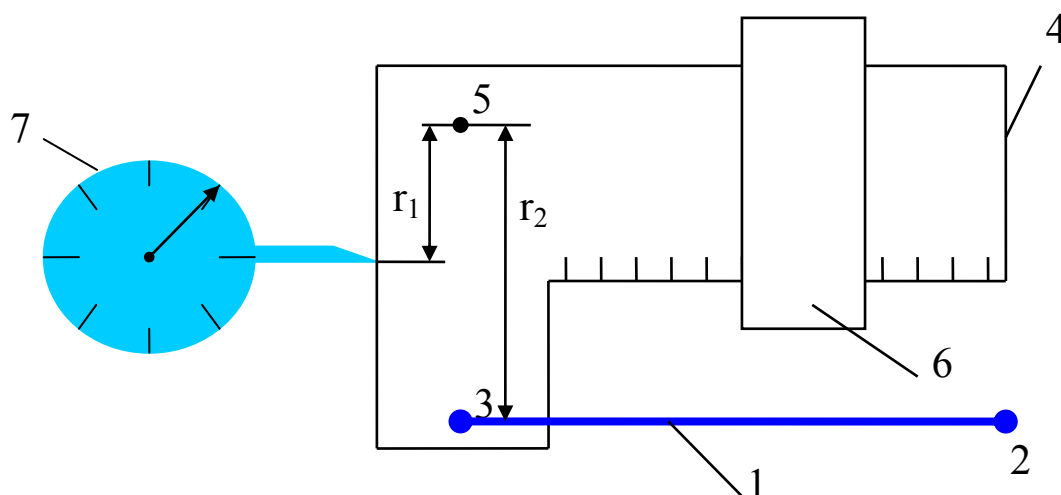


Рис 2.7

При смещении груза (6) рычаг поворачивается и проволока растягивается, что вызывает поворот стрелки датчика (7). Поворот стрелки на одно деление соответствует растяжению проволоки, равному 0,002 мм.

Поскольку расстояния  $r_1$  от оси вращения рычага (5) до острия датчика и  $r_2$  до точки крепления подвижного конца проволоки различны, необходимо показания индикатора датчика умножить на коэффициент

$k = \frac{r_1}{r_2} = 2,5$ . Тогда относительная деформация:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{n \cdot 0,002 \cdot 10^{-3} \cdot 2,5}{l_0}, \quad (2.6)$$

где  $n$  – число делений датчика,

$l_0$  – исходная длина недеформированной проволоки.

### Ход работы

1. Нагружают проволоку, изменяя положение груза (6). Записывают деление рычага  $N$  и показания датчика  $n$ . По формулам (2.5) и (2.6) определяют напряжение и деформацию. Чтобы убедиться, что деформация проволоки была упругой и, не возникло остаточных деформаций, проводят те же измерения, но *разгружая* образец.

*Внимание! Все данные должны быть занесены в таблицу и выражены в системе СИ.*

2. По полученным данным построить график  $\sigma(\varepsilon)$ .

3. По линейному участку графика определить модуль Юнга, как коэффициент линейной зависимости (тангенс угла наклона), что соответствует формуле (2.2).

### **Контрольные вопросы**

1. Объясните природу возникновения упругих сил.
2. Сформулируйте закон Гука. Приведите примеры.
3. Какие виды деформации вы знаете? Чем они отличаются?
4. Объясните зависимость напряжения от деформации, которая приведена на рисунке 2.6.
5. Что характеризует модуль Юнга? Чему он равен?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**

### **КОЛЕБАНИЯ**

Гармонические колебания тело (материальная точка) совершает, когда на него действует сила  $F$ , величина которой пропорциональна смещению из положения равновесия  $x$ , а направление – противоположно направлению смещения

$$F = -kx, \quad (3.1)$$

т. е. сила  $F$  всегда направлена к положению равновесия. Примером таких сил являются силы упругости.

Силы не упругие по природе, но удовлетворяющие закону упругих сил (закону Гука) (3.1), называются *квазиупругими*. Тело совершает гармонические колебания, если на него действует упругая или квазиупругая сила.

*Систему, совершающую гармонические колебания, называют гармоническим осциллятором.* Примеры: груз на пружине, маятник.

В частности, если на материальную точку массы  $m$  действует сила (3.1), уравнение движения ее запишется на основании второго закона Ньютона ( $ma = F$ ) так:

$$m\ddot{x} = -kx \quad (3.2)$$

или

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0, \quad (3.3)$$

где  $a = \ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2}$  – ускорение, приобретаемое материальной точкой массой  $m$ ,

$\ddot{x}$  – вторая производная от смещения по времени.

Обозначим

$$\frac{k}{m} = \omega^2 \quad (3.4)$$

Тогда дифференциальное уравнение, описывающее движение такой системы, имеет следующий вид:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0. \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) – линейное, однородное дифференциальное уравнение второго порядка. Его решением является  $x(t)$  – зависимость координаты колеблющейся точки от времени, в чем можно убедиться простой подстановкой:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.6)$$

где  $x$  – смещение из положения равновесия;  $A$  – амплитуда – максимальное смещение;  $(\omega t + \varphi)$  – фаза колебания ( $\varphi$  – начальная фаза, т.е. фаза колебания при  $t = 0$ );  $\omega$  – циклическая частота.

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi/T \quad (3.7)$$

Циклическая частота показывает, сколько колебаний тело совершает за  $2\pi$  секунд;  $\nu$  – частота колебаний – число колебаний за одну секунду;  $T$  – период – продолжительность одного колебания, т.е. время, за которое система возвращается в исходное положение. Зависимость  $x(t)$  представлена на рис.(3.1).

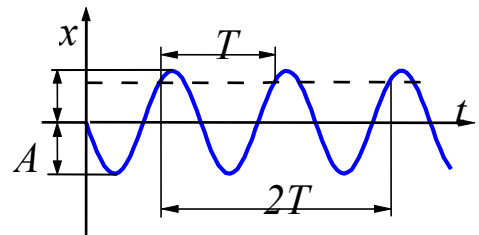


Рис. 3 1

Работа состоит из двух частей: изучение колебаний математического маятника и затухающих колебаний.

## 1. Математический маятник

Математический маятник – это материальная точка (шарик), подвешенная на длинной, невесомой нерастяжимой нити (рис. 3.2). Если шарик отвести от положения равновесия так, что нить образует угол  $\alpha$  с равновесным вертикальным положением, то на шарик будет действовать сила  $\vec{F}$ , стремящаяся вернуть его в положение равновесия. Сила  $\vec{F}$  является результирующей двух сил: силы тяжести  $m\vec{g}$  и силы натяжения нити  $T$ .

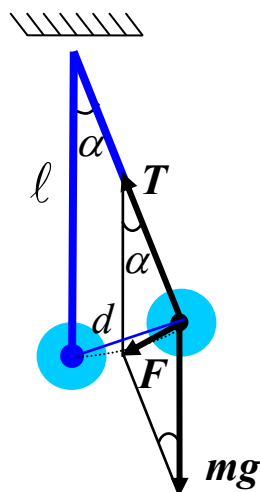


Рис. 3.2

Из рис. 3.2 видно, что  $F = mg \sin \alpha$ ,  $\sin \alpha = d/l$ , для малых  $\alpha$   $d \approx x$ .

Следовательно,  $F = -\frac{mg}{l}x$ .

Уравнение движения маятника запишется на основании второго закона Ньютона

$$m\ddot{x} = -\frac{mg}{l}x$$

или

$$\ddot{x} + \frac{g}{l}x = 0, \quad (3.8)$$

Из сравнения формул (3.8) и (3.5) следует, что для математического

маятника  $\omega^2 = \frac{g}{l}$ ,

а, следовательно, воспользовавшись (3.7), найдем период:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (3.9)$$

**Цель работы.** Определить ускорение силы тяжести  $g$ .

**Ход работы.** Измеряют период колебаний маятника  $T$  и длину  $l$  нити. Измерения повторяют несколько раз, данные заносят в таблицу, находят средние значения. Из формулы (3.9) находят ускорение силы тяжести  $g$ .

## 2. Затухающие колебания

При всяком свободном колебании происходит постепенное расходование энергии движения на работу против сил трения и сил сопротивления среды. При этом амплитуда и скорость колебательного движения убывают, т. е. происходит затухание колебаний.

Амплитуда затухающих колебаний уменьшается со временем по экспоненциальному закону:

$$A(t) = A_0 e^{-\beta t} \quad (3.10)$$

где  $\beta$  – коэффициент затухания. График таких колебаний приведен на рис. 3.3.

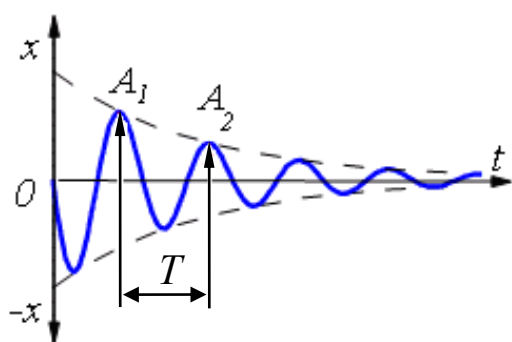


Рис. 3.3

Характерной особенностью затухающих колебаний является то, что отношение любых двух амплитуд, разделенных по времени одним периодом, остается постоянным в течение всего процесса колебаний. Действительно, для амплитуд, разделенных по времени одним периодом, согласно (3.10) можно записать

$$\frac{A_t}{A_{t+T}} = \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = e^{-\beta T} = \text{const} \quad (3.11)$$

Натуральный логарифм этого отношения, характеризующий затухание колебаний за период, называют *логарифмическим декрементом затухания*. Он равен:

$$\lambda = \ln \frac{A_t}{A_{t+T}} = \beta T. \quad (3.12)$$

Непосредственное измерение двух последовательных амплитуд  $A_1$  и  $A_2$  связано с большими погрешностями измерений. Для более точного определения характеристик затухающих колебаний измеряют две амплитуды, отстоящие на  $n$  периодов друг от друга. Тогда, например,

$$\ln \frac{A_0}{A_n} = n\lambda \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{1}{n} \ln \frac{A_0}{A_n}. \quad (3.13)$$

Используя (3.12) и (3.13), можно найти коэффициент затухания

$$\beta = \frac{1}{nT} \ln \frac{A_0}{A_n}. \quad (3.14)$$

Обычно для облегчения расчетов время колебаний  $nT$  выбирают таким образом, чтобы первоначальная амплитуда уменьшалась в целое число раз, например, вдвое. Поэтому



$$\frac{A_0}{A_n} = 2 \quad \text{и} \quad \beta = \frac{1}{nT} \ln 2 = \frac{0.693}{nT} . \quad (3.15)$$

Найдем время  $\tau$ , за которое амплитуда уменьшится в  $e$  раз. По определению  $e^{-\beta\tau} = e^{-1}$ , откуда  $\beta\tau = 1$ . Следовательно, коэффициент затухания  $\beta$  обратен по величине тому промежутку времени, за который амплитуда уменьшится в  $e$  раз ( $e = 2,7$ ).

*Добротностью колебательной системы* называется безразмерная величина  $Q$ , равная отношению энергии  $E(t)$  колеблющейся системы в произвольный момент времени  $t$  к убыли этой энергии за промежуток времени от  $t$  до  $t+T$ , т. е. за один условный период затухающих колебаний, умноженному на  $2\pi$ :

$$Q = \frac{E(t)}{E(t) - E(t+T)} 2\pi . \quad (3.16)$$

При малых значениях логарифмического декремента затухания ( $\lambda \ll 1$ ) добротность колебательной системы

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} . \quad (3.17)$$

**Цель работы** – определить величины, характеризующие затухание колебаний: коэффициент затухания, логарифмический декремент затухания, добротность.

Установка представляет собой (рис.3.4) груз (1), подвешенный на упругой проволоке (2), с закрепленным на ней проволочным указателем (3). Для увеличения затухания груз помещен в сосуд (5) с трансформаторным маслом.

Измерение амплитуды крутильных колебаний производится с помощью указателя (3) и шкалы (4).

### Ход работы.

1. Сообщить грузу крутильные колебания на угол  $3-5^\circ$ .
2. В момент, когда указатель находится в крайнем положении на целом числе делений шкалы, включить секундомер.
3. Вести счет полных колебаний  $n$  и, когда амплитуда уменьшится вдвое, выключить секундомер, определив время  $t$ .
4. Вычислить период колебаний по формуле  $T = t/n$ , где  $t$  – время, в течение которого груз совершил  $n$  полных колебаний.
5. По формуле (3.15) определить коэффициент затухания и, зная  $\beta$ , по формуле (3.12) определить логарифмический декремент затухания. Зная  $\lambda$ , по формуле (3.17) вычислить добротность  $Q$ .
6. Измерения повторить пять раз и вычислить средние значения  $\beta$ ,  $\lambda$  и  $Q$ . Данные заносить в таблицу.

### **Контрольные вопросы.**

1. Гармонические колебания, их основные характеристики.
2. Математический маятник, его уравнение движения, частота и период.
3. Какие колебания называются затухающими? Какие причины вызывают затухание?
4. Уравнение затухающих колебаний и его решение.
5. Назовите параметры, характеризующие затухание колебаний в системе и объясните их физический смысл.
6. Почему ускорение свободного падения одинаково для всех тел?

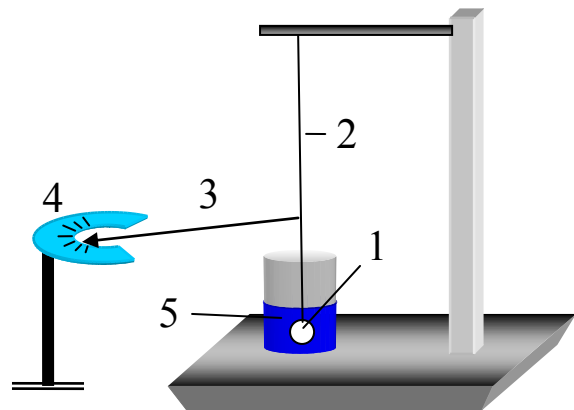


Рис. 3.4

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОЙ ГАЗОВОЙ ПОСТОЯННОЙ

*Состояние термодинамической системы* может быть охарактеризовано тремя основными параметрами: объемом  $V$ , давлением  $P$ , температурой  $T$ . Уравнение, связывающее эти параметры, называется уравнением состояния. Для идеального газа оно представляет собой уравнение Менделеева–Клапейрона

$$PV = \frac{m}{\mu} RT, \quad (4.1)$$

где  $m$  – масса газа,  $\mu$  – молярная масса (масса одного моля газа),  $R$  – универсальная газовая постоянная. Универсальной ее называют потому, что она одинакова для одного моля *любого* идеального газа. Из закона Авогадро следует, что 1 моль любого газа занимает объем 22,4 л при нормальных условиях, т. е. при  $P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и  $T = 273 \text{ К}$ . Подставляя эти значения в (4.1), получим, что газовая постоянная равна

$$R = 8,31 \cdot 10^3 \text{ Дж/кмоль К}.$$

Физический смысл  $R$  состоит в том, что она численно равна работе, которую может совершить 1 киломоль газа, расширяясь вследствие нагревания на 1 градус при постоянном давлении.

**Цель работы** – определить универсальную газовую постоянную экспериментально. Для этого можно использовать (4.1). Объем газа (воздух) равен объему колбы, в которую он помещен, давление можно измерить манометром, температуру – термометром, молярная масса воздуха известна – 28,8 кг/кмоль.

Проблема, однако, заключается в определении массы газа. Массу определяют взвешиванием, но при каждом измерении мы будем получать значение суммарной массы воздуха и колбы. Как же найти массу именно воздуха? Для этого поступают следующим образом. Прежде всего, заметим, что если газа в колбе нет ( $m = 0$ ), то и давление, естественно, равно нулю. Поэтому, если изменять давление газа и построить график зависимости  $P(M)$ , где  $M$  – это экспериментально измеряемая масса воздуха плюс колбы, то масса, при которой  $P = 0$  на этом графике будет соответ-

ствовать массе *пустой* колбы  $M_0$ . Тогда массу газа в колбе при каждом давлении легко определить вычитанием

$$m = M - M_0 \quad (4.2)$$

и подстановкой любой пары *соответствующих* значений  $m$  и  $P$  в (4.1) найти  $R$ .

## **Выполнение работы**

### **Описание установки.**

Установка состоит из колбы, манометра для измерения давления и насоса для изменения давления воздуха в колбе. Стеклоанная колба с помощью резинового отростка, снабженного зажимом, присоединяется к вакуумной установке. Как указано выше, необходимо построить график зависимости давления воздуха  $P$  от массы колбы с воздухом  $M$ . Для этого колбу присоединяют к установке резиновым отростком и *откачивают* насосом воздух до минимального давления (полностью, до нуля, откачать воздух не удастся, остаточная масса газа будет в колбе присутствовать). Перекрывают отросток зажимом, отсоединяют колбу и взвешивают, определяя  $M$ . Затем присоединяют колбу к установке снова и, открывая зажим, *впускают* некоторое количество воздуха, по манометру определяют давление и снова взвешивают. Повторяют измерения 5-6 раз, последний раз проводя взвешивание при атмосферном давлении.

Следует иметь в виду, что манометр показывает не давление воздуха в колбе, а *разность между ним и атмосферным давлением*. Пересчет делений манометра  $N$  в значения давления, выраженного в паскалях, делают по формуле

$$P = P_0 (1 - 0,01N),$$

где  $P_0$  – атмосферное давление, независимо измеренное барометром, имеющимся в лаборатории. Все *данные измерений заносят в таблицу*. Строят график зависимости  $P(M)$ , экстраполируют (продлевают) его к нулевому давлению и определяют массу *пустой колбы*  $M_0$ . Находят массу воздуха, как указано выше (4.2), и из уравнения (4.1) определяют газовую постоянную.

## **Контрольные вопросы**

1. Схема установки и последовательность выполнения работы.
2. Какие параметры характеризуют состояние идеального газа? В каких единицах они измеряются в системе СИ?
3. Уравнение Менделеева – Клапейрона.
4. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Реальные жидкости и газы обладают вязкостью (внутренним трением). Это явление наблюдается в движущихся газах и жидкостях и приводит к выравниванию скоростей различных слоев. Вязкость также влияет на движение тел в неподвижных газах и жидкостях.

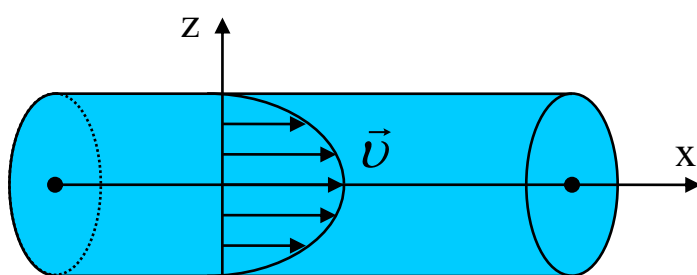


Рис. 5.1

Рассмотрим ламинарное (без перемешивания) течение жидкости или газа под действием разности давлений на концах трубы. По сечению трубы устанавливается распределение скоростей отдельных слоев (рис. 5.1). Молекулы соседних слоев сталкиваются в результате теплового движения.

При этом они обмениваются импульсами ( $p = mv$ ), в результате чего должно происходить выравнивание скоростей слоев в направлении оси Z. Таким образом, на молекулярно – кинетическом уровне вязкость обусловлена переносом импульса от слоя к слою в движущейся жидкости. Изменение импульса в единицу времени, согласно второму закону Ньютона, равно силе

$$\vec{F} = \frac{d\vec{P}}{dt} \quad (5.1)$$

Эта сила, возникающая за счет изменения импульса слоев, действующая между соседними слоями и называется силой вязкости или внутренним трением. Она равна

$$F = \eta \left| \frac{dv}{dz} \right| S, \quad (5.2)$$

где  $\eta$  – коэффициент вязкости, зависящий от природы жидкости и её состояния (например, температуры); единица вязкости – паскаль-секунда (Па\*с);

$\left| \frac{dv}{dz} \right|$  – модуль градиента скорости, который показывает, как быстро изменяется скорость в направлении оси z;

$S$  – площадь соприкосновения слоев.

При движении тела в вязкой среде на него действует сила сопротивления, зависящая от характерного линейного размера тела  $r$  и его скорости  $v$ , а также от вязкости среды. Для небольших скоростей справедлив закон Стокса

$$F = c\eta v r, \quad (5.3)$$

где  $c$  – постоянная, зависящая от формы тела;  $\eta$  – коэффициент вязкости жидкости. Для шара постоянная  $c = 6\pi$  и сила сопротивления

$$F = 6\pi\eta v r, \quad (5.4)$$

где  $r$  – радиус шара.

Воспользовавшись формулой Стокса, можно экспериментально определить коэффициент вязкости жидкости.

Рассмотрим шарик, свободно падающий в жидкости (рис. 5.2). На шарик действуют три силы: сила тяжести  $F_1 = \rho_{ш} V g$  ( $\rho_{ш}$  – плотность вещества шарика;  $V$  – его объем), направленная вертикально вниз; выталкивающая архимедова сила  $F_2 = \rho_{ж} V g$  ( $\rho_{ж}$  – плотность жидкости), направленная вертикально вверх; и сила сопротивления  $F_3 = 6\pi\eta v$ , также направленная вверх. Сначала шарик движется ускоренно. Ускорение сообщается равнодействующей всех трех сил, причем сила тяжести и выталкивающая сила не меняются в процессе движения. По мере увеличения скорости движения шарика растет пропорционально ей сила сопротивления (5.3). В результате силы, действующие на шарик, компенсируют друг друга, и он продолжает дальше двигаться в соответствии с первым законом Ньютона с постоянной скоростью.

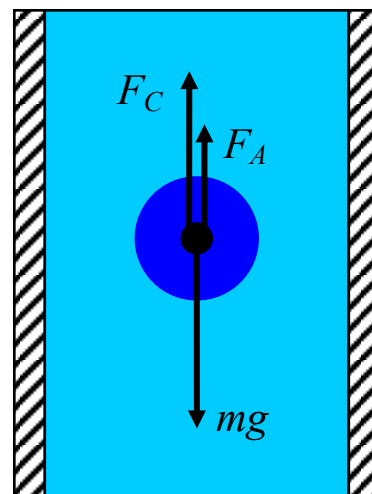


Рис. 5.2

Условие установившегося движения:

$$\sum \vec{F}_i = 0; \quad F_1 - F_2 - F_3 = 0; \quad (5.5)$$

$$\frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_{\phi} - \rho_{\alpha}) g = 6\pi r \eta v. \quad (5.6)$$

$$\eta = \frac{2r^2 (\rho_{\phi} - \rho_{\alpha}) g}{9v}. \quad (5.7)$$

В работе исследуется температурная зависимость коэффициента вязкости глицерина.

## **Выполнение работы**

**Цель работы** -определить коэффициент вязкости глицерина при разных температурах, построить график зависимости  $\eta(T)$ .

### **Описание установки.**

Установка представляет собой длинную стеклянную трубку, которая расположена вертикально и заполнена глицерином. В работе используются стальные шарики диаметром 0,2 см. На трубке имеются две метки на расстоянии  $L$  друг от друга. Верхняя метка расположена на таком расстоянии от поверхности жидкости, что ниже нее шарик уже движется с установившейся скоростью.

### **Ход работы.**

1.Опускают шарик в жидкость как можно ближе к оси трубки. Измеряют секундомером время  $\tau$  прохождения шариком расстояния между метками  $L$ .

2.Определяют скорость движения шарика по формуле

$$v = \frac{L}{\tau} \quad (5.8)$$

3.Рассчитывают коэффициент вязкости глицерина по формуле (5.7) для комнатной температуры.

4.Включают электронагреватель в сеть 12 В и нагревают глицерин до 50°C. После этого *по мере охлаждения* глицерина, через каждые 5°C определяют  $\eta$ . Строят график полученной зависимости.

## **Контрольные вопросы**

1. Природа сил вязкости в жидкости.
2. От чего зависит сила сопротивления, действующая на тело, движущееся в вязкой среде?
3. Какие силы действуют на падающий шарик? Как меняется характер его движения?
4. Как можно пояснить полученную зависимость коэффициента вязкости жидкости от температуры?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### ПОВЕРХНОСТНОЕ НАТЯЖЕНИЕ

В отличие от жидкости, газ не имеет собственного объема, и его объем равен объему сосуда, в котором он находится. Между молекулами жидкости существуют заметные силы притяжения (когезии) электромагнитной природы. Это приводит к тому, что жидкость имеет собственный объем, а значит и *поверхность*, отделяющую этот объем от остального пространства.

На находящуюся *внутри жидкости* молекулу со стороны соседей действуют силы притяжения, *результатирующая* которых в среднем *равна нулю* (рис 6.1). Молекулы жидкости, находящиеся *на поверхности*, испытывают когезионную силу *не равную нулю* и направленную вглубь жидкости. Это приведет к сокращению поверхности – поверхностному натяжению.

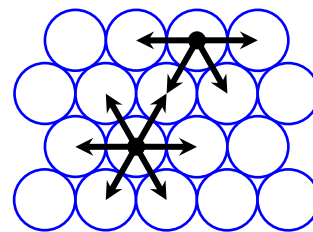


Рис. 6.1

Если попытаться растянуть поверхность жидкости, нужно приложить внешнюю силу против сил сцепления молекул. Работа  $dA$  растягивающей поверхности силы равна свободной энергии  $dE$ , которой будет обладать образующаяся при растяжении дополнительная поверхность  $dS$ .

$$dA = dE = \sigma \cdot dS \quad (6.1)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Таким образом, увеличивая поверхность жидкости, мы увеличиваем ее энергию. Благодаря поверхностному натяжению, любой объем жидкости стремится наоборот, уменьшить площадь поверхности. При этом следует помнить, что жидкости мало сжимаемы, и уменьшить их объем практически не удастся (молекулы энергично отталкиваются при попытке сжать жидкость). Эти два фактора - поверхностное натяжение и несжимаемость жидкости – приводят к тому, что жидкость будет иметь минимальную поверхность при заданном объеме – это поверхность сферы (именно по этому капли жидкости сферические, а не цилиндрические или, например, кубические). Сферическая форма капель может быть искажена действием силы тяжести.

Для расчетов удобно использовать силу поверхностного натяжения  $F_n$ , направленную по касательной к поверхности и пропорциональную длине контура  $l$ , который ограничивает поверхность. Таким образом выбранная сила приведет к тому же наблюдаемому эффекту – сокращению поверхности.



$$F = -\frac{dA}{dx} = -\frac{\sigma \cdot dS}{dx} = -\sigma \cdot l \quad (6.2)$$

Знак минус показывает, что сила направлена в сторону, противоположную растяжению поверхности  $dx$ .

Тогда видно, что коэффициент поверхностного натяжения  $\sigma$  равен силе, действующей на единицу длины контура  $l$

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad [\sigma] = \text{Н/м} \quad (6.3)$$

Сила поверхностного натяжения создает избыточное давление под искривленной поверхностью жидкости.

Пусть поверхность имеет форму сферы радиуса  $R$  (рис. 6.2). Выделим на этой сфере участок площадью  $S$ , опирающийся

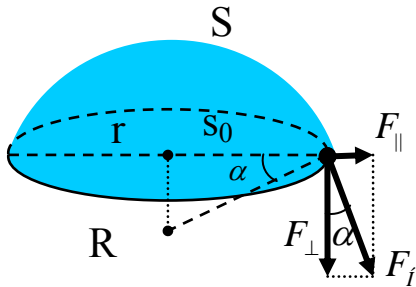


Рис. 6.2

на основание - площадку  $S_0$ . Равнодействующая сил поверхностного натяжения  $F$ , действующих по периметру этой площадки направлена перпендикулярно площадке и равна

$$F_{\perp} = F \cos \alpha = \sigma \cdot l \cos \alpha = \sigma \cdot 2\pi r \cos \alpha$$

Из рисунка 6.2 видно, что  $\cos \alpha = r/R$ . Тогда

$$F_{\perp} = \frac{\sigma \cdot 2\pi r^2}{R}, \quad (6.3)$$

а составляющие  $F_{\parallel}$  в сумме дают нуль. Таким образом, сила поверхностного натяжения создаст *дополнительное давление  $\Delta p$  под искривленной поверхностью жидкости*, равное

$$\Delta p = \frac{F_{\perp}}{S} = \frac{F_{\perp}}{\pi r^2} = \frac{2\sigma}{R} \quad (6.4)$$

### Капиллярные явления

Если жидкость налита в сосуд и граничит со стенками, то возникает взаимодействие между молекулами жидкости и молекулами стенки. Это взаимодействие приведет к искривлению поверхности жидкости вблизи стенки. Искривленная поверхность жидкости называется мениском. В широких сосудах поверхность жидкости искривляется только вблизи стенок, но в капиллярах искривленной оказывается вся поверхность

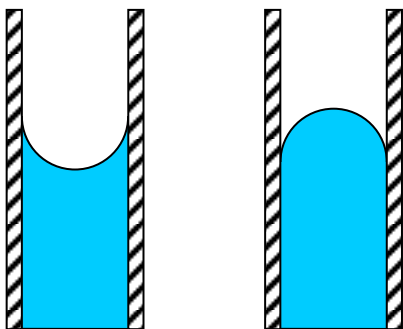


Рис. 6.3

жидкости. Силы поверхностного натяжения, как было указано, стремятся стянуть, сжать поверхность жидкости. В результате действия этих сил, искривленная поверхность жидкости оказывает давление на воздух, находящийся над ней, если мениск вогнутый (смачивание) либо на остальную жидкость под искривленной поверхностью, когда мениск выпуклый (не смачивание) (рис 6.3).

Такое добавочное, по сравнению с атмосферным, давление направлено в сторону центра кривизны поверхности. Оно равно:

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$$

Это созданное силами поверхностного натяжения давление, приводит к поднятию уровня жидкости в капиллярах. Действительно, если в широкий сосуд с жидкостью опустить тонкую трубку – капилляр, то уровень жидкости в нем, в случае смачивания, окажется выше, чем в широком сосуде. Это происходит потому, что под искривленной поверхностью мениска, возникающее добавочное давление, направлено к центру кривизны поверхности, т. е. противоположно атмосферному. В результате давление над жидкостью в капилляре оказывается меньше атмосферного на величину  $\Delta p$ , и жидкость начинает двигаться в сторону низкого давления – вверх. По мере роста столбика жидкости, в капилляре растет его вес, который создает направленное вниз гидростатическое давление

$$p = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho g \cdot \pi r^2 \cdot h}{\pi r^2} = \rho gh \quad (6.5)$$

Когда добавочное давление становится равным гидростатическому, подъем жидкости прекращается, устанавливается равновесие.

$$\rho gh = \frac{2\sigma}{R} \quad (6.6)$$

Отсюда можно найти высоту подъема жидкости  $h$ :

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \quad (6.7)$$

## **Выполнение работы**

**Цель работы.** Определить коэффициент поверхностного натяжения жидкости разными методами.

### **Метод взвешивания капель**

#### **Описание установки и ход работы.**

1. Налить воду в вертикальную трубку и отрегулировать ее вытекание по капле.

- Отрыв капли происходит, когда ее вес  $mg$  становится больше, чем силы поверхностного натяжения  $F_{\text{н}}$ , действующие по контуру шейки капли. В момент, предшествующий отрыву  $mg = F_{\text{н}}$

$$mg = \sigma \cdot \pi d, \quad \sigma = \frac{mg}{\pi d} \quad (6.8)$$

где  $d$  – диаметр шейки капли в момент отрыва.

- С помощью микроскопа, наблюдая за отрывом капель, необходимо измерить диаметр шейки. Для этого число делений шкалы необходимо умножить на цену деления (значение одного наименьшего деления шкалы в миллиметрах). Определить цену деления можно, наблюдая эталонную миллиметровую линейку в данный микроскоп.

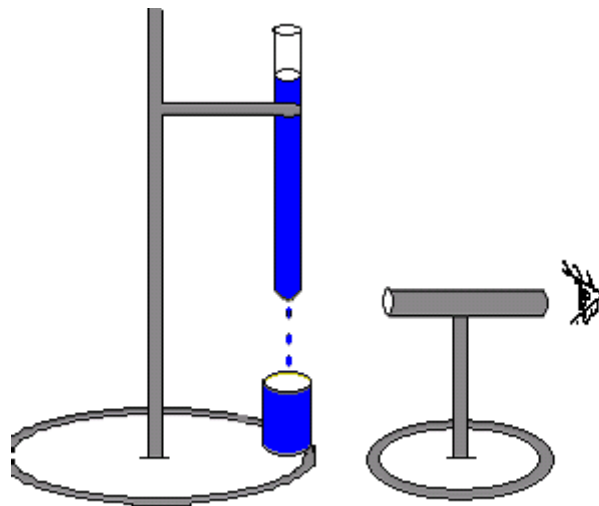


Рис. 6.4

- Массу капли определяют взвешиванием. Взвешенный пустой стакан помещают под поток капель жидкости, вытекающий из трубки, и считают количество капель, упавших в него (30 – 50 капель). После чего взвешивают стакан с жидкостью и определяют массу одной капли.
- По формуле (6.8) находят коэффициент поверхностного натяжения воды.

### **Метод определения коэффициента поверхностного натяжения по высоте подъема в капилляре**

#### **Описание установки.**

- В широкий стакан с водой погружены две капиллярные трубки с разными радиусами внутренних каналов. Уровни жидкости в каналах согласно (6.2) разные. Разность уровней в двух трубках:

$$h_1 - h_2 = \frac{2\sigma}{\rho g} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right),$$

где  $\rho$  – плотность воды.

- Разность уровней измеряют с помощью микроскопа. Для измерения разности уровней жидкости в двух капиллярах, наводят микроскоп на

один из менисков и совмещают с ним некоторое произвольное деление шкалы. Записывают данное деление шкалы и показания микрометрического винта микроскопа. Не передвигая микроскоп, с помощью микрометрического винта совмещают записанное деление шкалы с мениском во втором капилляре. Находят разность уровней. Повторяют измерение не менее трех раз и определяют среднее значение.

3. По формуле

$$\sigma = \frac{\rho g (h_1 - h_2) r_1 r_2}{2(r_2 - r_1)} \quad (6.9)$$

вычисляют коэффициент поверхностного натяжения.

### **Контрольные вопросы**

1. Чем обусловлено различие свойств жидкостей и газов?
2. Какова природа сил поверхностного натяжения?
3. Физический смысл коэффициента поверхностного натяжения. От чего он зависит и в каких единицах измеряется?
4. От чего зависит высота поднятия жидкости в капиллярах? В каком случае уровень жидкости в капилляре ниже, чем в широком сосуде?
5. \* На какую высоту поднимется жидкость (вода) по стеблю колоса, если диаметр капилляра 0,05 мм?

## **ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ**

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7**

#### **РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЙ АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА**

Основными характеристиками электрических цепей являются сила тока  $I$ , напряжение  $U$ , сопротивление  $R$ .

*Силу тока в электрических цепях измеряют амперметрами.* Принцип действия их может быть различен. В настоящее время применяют стрелочные и цифровые приборы, индикаторами тока в которых служит стрелка со шкалой либо цифровое табло. В лабораторной практике употребляются стрелочные приборы магнитоэлектрической и электромагнитной систем.

В приборах *магнитоэлектрического* типа измеряемый ток протекает по катушке, расположенной между полюсами постоянного магнита. Катушка закреплена на оси, с которой скреплены также две спиральные пружины и стрелка. В отсутствие тока плоскость катушки параллельна линиям магнитного поля. При протекании тока возникает приложенный к

катушке вращающий момент. При этом стрелка поворачивается. Отклонению катушки со стрелкой на максимальный угол при любом токе препятствуют упругие силы закручивающихся пружин. В результате угол поворота всей системы будет пропорционален проходящему по катушке току. Измеряется данный угол величиной перемещения стрелки по шкале прибора, отградуированной в амперах. *Градуировка производится сравнением показаний данного прибора с показаниями эталонного.*

Приборы этой системы пригодны только для измерения постоянных токов. Уменьшая силы трения в опорах оси и ослабляя противодействующие моменты упругих сил, можно изготовить приборы, рассчитанные на измерение очень малых токов, обладающие высокой чувствительностью. Чувствительностью прибора называют отношение  $S = \frac{dn}{dI}$ , где

$dn$  – число делений, на которое перемещается стрелка прибора при изменении тока  $dI$ . Увеличить чувствительность имеющегося прибора нельзя.

В приборах *электромагнитной системы* измеряемый ток проходит по неподвижной катушке, создавая в ней неоднородное магнитное поле. Вблизи помещается пластинка или стержень из мягкого железа. Действие прибора основывается на втягивании пластинки или стержня в неоднородное магнитное поле катушки.

Приборы этой системы пригодны для измерения и постоянных, и переменных токов. Строгой пропорциональности между током и углом поворота стрелки нет, поэтому шкала приборов неравномерна.

Каждый прибор, предназначенный для измерения силы тока, рассчитан на определенное *максимальное значение тока*  $I_{max}$  - *предел измерений*.

Расширить предел измерений прибора, т.е. измерять им токи значительно большие, чем те, на которые он рассчитан, можно. Для этого достаточно параллельно прибору подключить *шунт* – сопротивление, подобранное так, что некоторая часть тока пройдет через него (рис. 7.1). Через прибор теперь идет *часть общего тока*. Зная, какую долю она составляет по отношению ко всему измеряемому току, можно судить о токе в целом.

Шунтирование используют в многошкальных приборах. С помощью переключателя каждый из них может быть подключен параллельно измерительной системе прибора. Максимальную силу тока, измеряемого прибором при подключении данного шунта, указывают на корпусе прибора возле переключателя. *Цену деления шкалы опреде-*

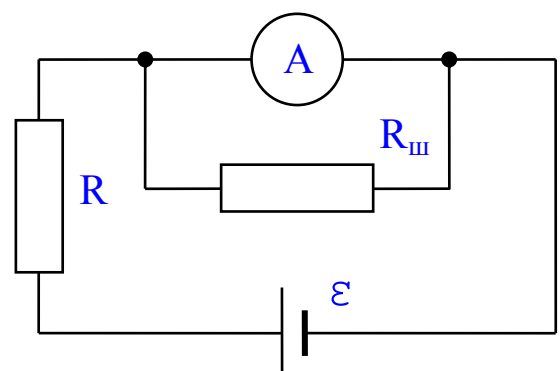


Рис. 7.1

ляют как частное максимального тока и полного числа делений шкалы  $N$ :

$$\frac{I_{\max}}{N}.$$

*Напряжение в электрических цепях измеряют вольтметрами.* Вольтметр подключают параллельно сопротивлению участка цепи, на котором меряют напряжение (рис. 7.2).

Устройство и принцип действия вольтметров не отличаются от устройства и принципа действия амперметров. Ток  $I_V$  ответвляется в измерительную систему вольтметра и приводит ее в движение. На шкале же нанесены деления, соответствующие не току, а падению напряжения на внутреннем сопротивлении  $R_V$ , равному напряжению между точками А и В схемы:  $U_{AB} = I_V R_V$ .

Принципиальным отличием вольтметров от амперметров является величина внутреннего сопротивления. Внутреннее сопротивление вольтметра должно быть большим, чтобы ток  $I_V$ , который в него ответвляется, и искажения, вносимые в электрическую цепь подключением вольтметра, были минимальны.

Расширить пределы измерения вольтметра можно, если последовательно с прибором подключить некоторое добавочное сопротивление  $R_A$  (рис. 7.3), при этом на вольтметр будет приходиться лишь часть измеряемого напряжения, и им можно будет измерять большие напряжения, чем те,

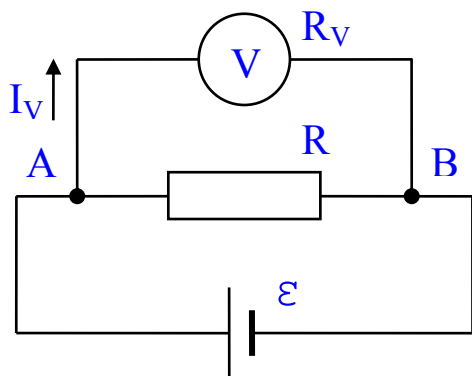


Рис. 7.2

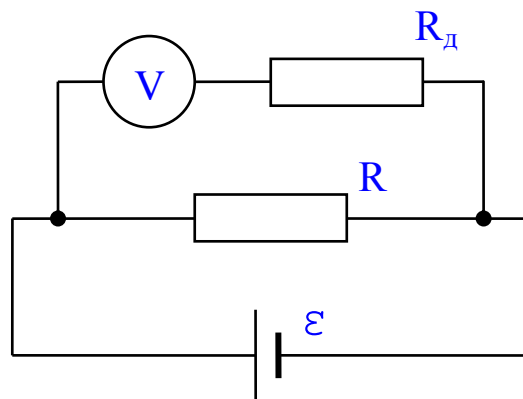


Рис. 7.3

на которые он первоначально рассчитан.

### ***Выполнение работы***

**Цель работы** – ознакомление с электроизмерительными приборами, расширение пределов измерений и градуировка амперметра и вольтметра.

### **Ход работы.**

1. *Шунтирование и градуировка амперметра по постоянному току.*

Собрать схему (рис. 7.4). Последовательно с нагрузкой  $R_2$  включить исследуемый стрелочный прибор А и эталонный (образцовый) Р. Схему подключить к источнику напряжения, клеммы которого обозначены на панели –  $U$ .

Снять зависимость числа делений шкалы от силы тока  $n = n(I)$ . Построить график  $n(I)$ . Нанести на график погрешности измерений. Определить цену деления и чувствительность прибора.

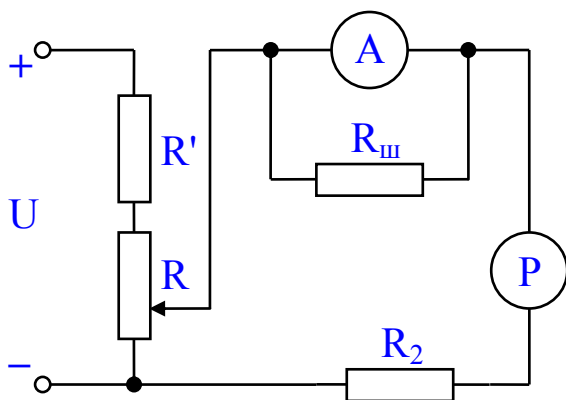


Рис. 7.4

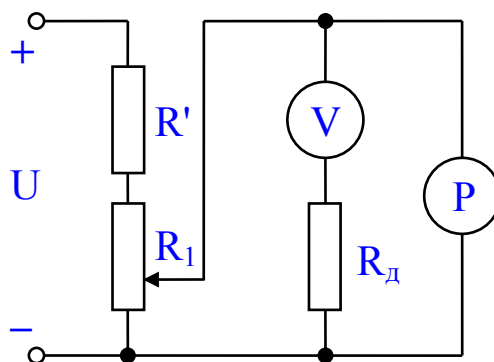


Рис. 7.5

2. *Расширение предела измерений и градуировка вольтметра по постоянному напряжению.*

В качестве вольтметра V используется тот же стрелочный прибор, что и при выполнении предыдущего задания, к которому подключается добавочный резистор  $R_d = R_2$ . Собрать схему (рис. 7.5). Снять зависимость числа делений прибора  $n$  от напряжения между точками АВ –  $n(U)$ . Построить градуировочный график. Определить цену деления и чувствительность прибора.

### **Контрольные вопросы**

1. Основные физические величины, характеризующие постоянный электрический ток и приборы для их измерения.
2. Каков принцип действия приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем?
3. Что такое чувствительность и цена деления прибора?
4. Для чего шунтируют амперметры?
5. Как можно расширить предел измерений вольтметра?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8

### ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ АМПЛИТУДЫ И ЧАСТОТЫ ПЕРЕМЕННОГО СИГНАЛА

Электронный осциллограф (ЭО) предназначен для исследования *переменных* токов и напряжений - измерения их амплитуд, частот, фаз, определения длительности (периодов), формы сигналов и других характеристик. Области применения ЭО чрезвычайно многообразны как в научных исследованиях, так и в инженерной практике.

**Цель данной работы** – уяснить принцип действия и назначение электронного осциллографа. Научиться использовать осциллограф для наблюдения формы сигнала, измерения напряжения, частоты, разности фаз, изучить явления, возникающие при сложении колебаний одинакового направления и взаимно перпендикулярных колебаний.

#### Устройство и принцип действия ЭО.

Любой осциллограф состоит из электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), каналов вертикального Y и горизонтального X отклонений электронного пучка, генератора развертки, блока питания и органов управления.

В осциллографе для измерения токов и напряжений индикатором служит не стрелка, а пучок электронов. Электроны имеют малую массу и ими легко управлять с помощью электрического поля, так как они заряжены. Ударяясь об экран, покрытый специальной краской, они вызывают его свечение, что позволяет визуализировать исследуемые переменные процессы.

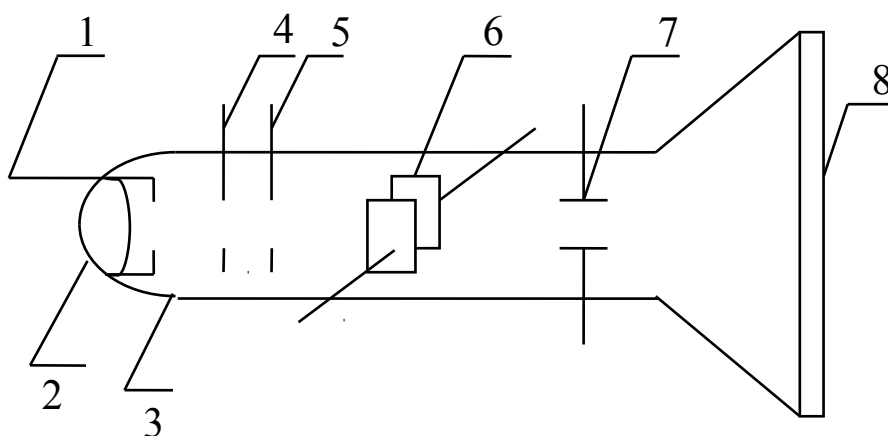


Рис. 8.1



ЭЛТ (рис. 8.1) состоит из откачанной до высокого вакуума стеклянной колбы, внутри которой помещается источник электронов катод 1 (отрицательный электрод), нагреваемый нитью накаливания 2. В результате термоэлектронной эмиссии электроны покидают катод. Катод находится внутри цилиндрического электрода 3, который является управляющим. Изменением отрицательного потенциала на электроде 3 регулируется количество электронов, проходящих через его отверстие, что изменяет яркость пятна на экране 8 ЭЛТ. Первый анод 4 (положительный электрод) служит для фокусировки, а второй анод 5 – для ускорения электронов. Нагреватель, катод, управляющий электрод и оба анода образуют электронную пушку.

Выйдя из электронной пушки, сформированный электронный луч проходит между двумя парами металлических пластин 6 и 7, служащих для его отклонения. Если электрическое поле между пластинами отсутствует, то электронный луч не отклоняется и при соответствующей юстировке электронно-оптической системы попадает в центр экрана ЭЛТ, вызывая его свечение.

Если к отклоняющим пластинам подключить измеряемое напряжение, то возникающее между ними электрическое поле, действуя на электронный пучок, вызовет его отклонение и пятно на экране сместится. Вертикально расположенные пластины 6 служат для отклонения луча в горизонтальной плоскости (пластины X), а горизонтально расположенные пластины 7 – в вертикальной плоскости (пластины Y). Соответственно измеряемое напряжение подается на вход Y или X. При приложении к вертикально отклоняющим пластинам измеряемого напряжения  $U$ , луч смещается на расстояние  $y$ , определяемое соотношением

$$y = \frac{lL}{2U_k d} U, \quad (8.1)$$

где  $l$  – длина пластин;  $d$  – расстояние между ними;  $L$  – расстояние от пластин до экрана;  $U_k$  – ускоряющая разность потенциалов.

Важной характеристикой ЭЛТ является ее чувствительность по напряжению  $S$ , под которой понимается величина, численно равная смещению луча на экране ЭЛТ при приложении напряжения к отклоняющим пластинам, равного одному вольту:

$$S = \frac{y}{U} = \frac{lL}{2U_k d}. \quad (8.2)$$

Чувствительность ЭЛТ по осям X и Y различна.

Для наблюдения изменения сигнала со временем на горизонтальную пару пластин подают пилообразное напряжение от имеющегося в осцил-

лографе генератора развертки - *включают развертку*. Чтобы изображение зависимости исследуемого напряжения от времени было устойчивым на экране, необходимо согласовать периоды пилообразного и исследуемого напряжения, для чего используют ручку "синхронизация".

## Выполнение работы

### Ход работы.

Все наблюдаемые осциллограммы зарисовывать в рабочей тетради.

#### 1. Измерение напряжения.

а) Собрать схему (рис. 8.2), используя панель лабораторной работы 1. Включить осциллограф, отключить развертку и установить светящуюся точку в центре экрана. Подать на вход Y постоянное напряжение. Измерить величину напряжения. Что происходит с изменением величины напряжения  $U_y$  и его полярности? Объяснить.

б) Отключить напряжение от входа Y и подать на вход X. Повторить наблюдения предыдущего задания.

в) Подключить делитель напряжения  $R'R_1$  к клеммам источника переменного напряжения  $\sim U$  и подать сигнал на вход X. Что наблюдается в этом случае? Объяснить.

г) Переключить переменное напряжение со входа X на вход Y. Что наблюдается в этом случае? Какое различие между изображением задания а) и данного задания?

д) Включить развертку. Подать постоянное, а затем переменное напряжения на вход Y. Каково различие между этими изображениями?

е) Измерить величину переменного напряжения, подаваемого на вход Y, с помощью осциллографа. Найти амплитудное  $U_0$  и эффективное  $U_{эф}$  значения напряжений.  $U_{эф} = U_0 / \sqrt{2}$ .

ж) Измерить напряжение  $U_v$  с помощью цифрового вольтметра (В7–21А). Какое напряжение показывает этот прибор –  $U_0$  или  $U_{эф}$ ?

#### 2. Измерение частоты.

Подать на вход Y переменное напряжение. синусоидальный сигнал от генератора. Изменяя постоянную развертки (период T), получить устойчивое изображение синусоиды. Определить длину  $l$ , соответствующую

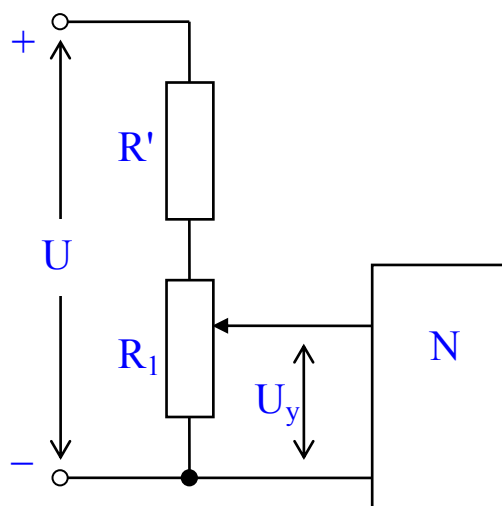


Рис. 8.2

целому числу периодов сигнала  $n$ . Тогда частота  $f$  определяется из соотношения

$$f = \frac{n}{lT}. \quad (8.3)$$

### 3. Сложение колебаний одинакового направления с близкими частотами.

При сложении колебаний с близкими частотами

$$x_1 = a \cos \omega t,$$

$$x_2 = a \cos (\omega + \Delta\omega) t$$

результатирующее колебание описывается уравнением

$$x = 2a \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \cos \omega t. \quad (8.4)$$

Периодическое изменение амплитуды результирующего колебания называется биениями. Период биений

$$T = \frac{2\pi}{\Delta\omega}. \quad (8.5)$$

Для наблюдения биений собрать схему (рис. 8.3). В качестве смесителя использовать трансформатор, смонтированный на панели работы. Подать на обмотку 1 трансформатора сигнал частотой 150-500 Гц от звукового генератора. Получить на экране осциллографа устойчивое изображение синусоиды. Замерить амплитуду сигнала.

Установить амплитуду сигнала на экране, равную предыдущей, после чего подать одновременно сигналы на обмотки 1 и 2. Плавно изменяя частоту одного из генераторов, получить биения. Определить период биений, зная постоянную развертки, а затем, используя (8.5), разность частот  $\Delta\omega$ .

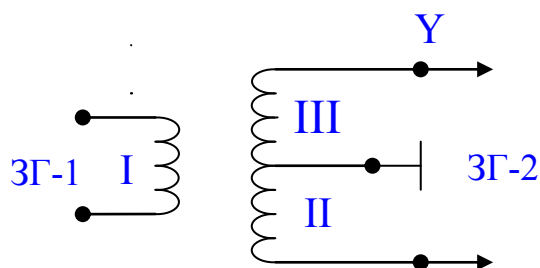


Рис. 8.3

### 4. Сложение взаимно перпендикулярных колебаний и определение разности фаз.

Пусть колебания вдоль осей X и Y описываются уравнениями:

$$x = a \cos \omega t,$$

$$y = b \cos (\omega t + \delta),$$

тогда результирующее колебание, полученное в результате сложения указанных выше, описывается уравнением кривой второго порядка

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} - \frac{2xy}{ab} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (8.6)$$

При сложении взаимно перпендикулярных колебаний с кратными частотами на экране наблюдаются так называемые фигуры Лиссажу. Если частота одного из сигналов неизвестна, ее можно определить по формуле

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n},$$

где  $m$  – число касаний фигурой Лиссажу вертикальной линии;  $n$  – то же горизонтальной.

Анализируя фигуры Лиссажу, можно определить разность фаз между двумя сигналами одной частоты. Если изображение представляет собой диагональную прямую, то разность фаз равна 0 или  $\pi$ . Если изображение – эллипс, то

$$\delta = \arcsin (A / B),$$

где  $A$  – расстояние между точками пересечения эллипса с вертикалью,  $B$  – максимальный размер эллипса по вертикали.

а) Собрать схему (рис. 8.4). В качестве  $R$  использовать сопротивление  $R_{ин}$  работы 1, а в качестве  $L$  обмотки 2 и 3 трансформатора, смонтированного на панели. Установить частоту генератора  $f = 300-500$  Гц. Выключить развертку осциллографа. Изобразить результирующую кривую. Определить разность фаз.

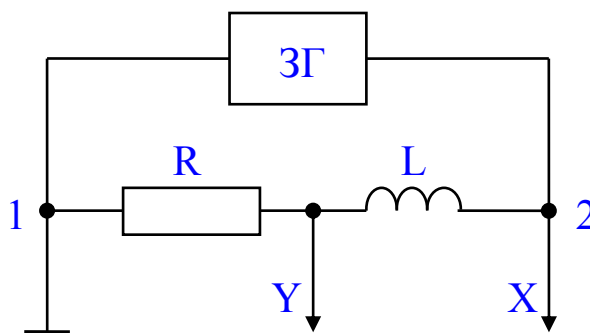


Рис. 8.4

б) Подать на вход X сигнал от одного генератора, а на вход Y от другого. Отключить развертку. Получить фигуры Лиссажу при соотношении частот

$$f_y = \frac{1}{2} f_x ; \quad f_y = f_x ; \quad f_y = \frac{3}{2} f_x ; \quad f_y = \frac{1}{3} f_x .$$

Убедиться в том, что

$$\frac{f_x}{f_y} = \frac{m}{n} .$$

### Контрольные вопросы

1. Для чего применяется электронный осциллограф?
2. Устройство и принцип работы электронно-лучевой трубки.
3. Как с помощью осциллографа можно измерить параметры переменного напряжения?

4. Как определить частоту по методу фигур Лиссажу?
5. Объяснить возникновение биений.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОЛИЗА

*Электролиз* – процесс электрохимического окисления-восстановления, происходящий на погруженных в электролит электродах, при прохождении электрического тока.

*Электрическим током* называют упорядоченное (направленное) движение заряженных частиц: электронов, ионов.

*Электролитами* называются жидкие или твёрдые вещества, в которых в сколько-нибудь заметных концентрациях присутствуют ионы, способные перемещаться и проводить электрический ток. В узком смысле – соли, растворы которых проводят электрический ток из-за наличия ионов, образующихся в результате электролитической диссоциации.

Упорядоченное движение ионов в жидкостях происходит в электрическом поле, которое создаётся *электродами* – проводниками, соединёнными с полюсами источника тока. *Анодом* называется *положительный* электрод, *катодом* – *отрицательный*.

Электрический ток в электролитах сопровождается явлением электролиза.

**Цель работы.** Определить заряд электрона ( $e$ ) методом электролиза раствора медного купороса (сернокислой меди)  $\text{CuSO}_4$ .

В водном растворе молекулы медного купороса ( $\text{CuSO}_4$ ) диссоциируют на ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ионы меди осаждаются на катоде и нейтрализуются, присоединяя два электрона. Ионы  $\text{SO}_4^{2-}$  движутся к аноду (рис.9.1) и, если он изготовлен из меди, взаимодействуют с ним, снова образуя сульфат меди  $\text{CuSO}_4$ . Суммарный эффект состоит в том, что чистая медь переносится с анода на катод без уменьшения концентрации сульфата меди в растворе. В результате катод покрывается медью, а с анода медь постепенно переходит в раствор.

В 1874 г. ирландский физик Дж. Стоней ввел понятие элементарного электрического заряда и оценил его величину, используя метод электролиза.

В основе этого метода лежат законы электролиза, открытые Фарадеем. Фарадей экспериментально установил: масса вещества  $m$ , выделяющегося на электроде за время  $t$  при прохождении электрического тока через электролит, пропорциональна силе тока  $I$  и времени  $t$ :

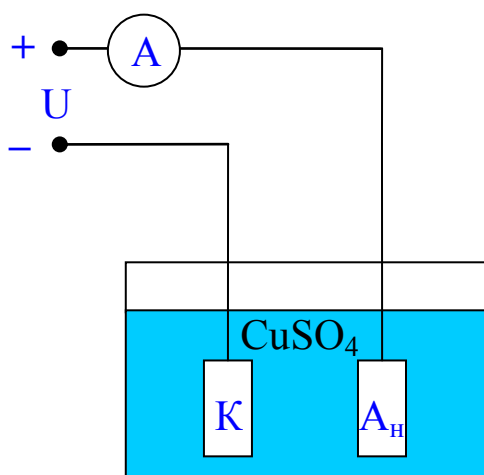


Рис. 9.1

$$m = kIt, \quad (9.1)$$

где  $k$  – коэффициент, который зависит от природы вещества и называется электрохимическим эквивалентом вещества.

$$k = \frac{1}{eN_A} \frac{M}{n}, \quad (9.2)$$

где  $e$  – заряд электрона;

$N_A = 6.023 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  – число Авогадро;

$M$  – молярная масса вещества;

$n$  – валентность вещества.

Подставляя значения  $k$  в (9.1), получим:

$$k = \frac{M}{eN_A n} \cdot It \quad (9.3)$$

Из (9.3) найдем модуль заряда электрона:

$$e = \frac{Mit}{mN_A n} \quad (9.4)$$

Для меди  $M = 0,064 \text{ кг/моль}$ ,  $n=2$ .

## **Выполнение работы**

### **Описание лабораторной установки.**

Схема лабораторной установки дана на рисунке 9.1. На схеме показаны: выходные клеммы (+, -) регулируемого источника постоянного тока, амперметр А, сосуд с водным раствором  $\text{CuSO}_4$ , положительный медный электрод – анод  $\text{Ан}$ , отрицательный медный электрод – катод К.

При помощи регулятора тока устанавливается определённая сила тока. Масса вещества  $m$ , выделившегося на электроде при электролизе, определяется по разности масс сухого катода после электролиза и до электролиза. Время электролиза  $t$  измеряется при помощи секундомера и часов.

### **Ход работы.**

1. Снять и высушить катод. Определить его массу  $m_1$  путем взвешивания.
2. Установить катод и анод в растворе  $\text{CuSO}_4$ .
3. Включить источник питания и секундомер. Установить при помощи регулятора нижнюю силу тока в цепи. Поддерживать данную силу тока постоянной в течение всего эксперимента.
4. Через промежуток времени  $t$ , указанный преподавателем, отключить источник питания.
5. Снять и высушить катод. Определить его массу  $m_2$  после электролиза.
6. Используя соотношение (9.4) и результаты эксперимента, найти заряд электрона.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое электрический ток? При каких условиях вещество будет проводить ток?
2. Что называют электролизом? Какие вещества называют электролитами?
3. Под действием каких сил ионы движутся в растворе во время электролиза?
4. Объясните процесс выделения меди на катоде при электролизе раствора сернокислой меди.
5. Сформулируйте закон Фарадея.
6. Что такое электрохимический эквивалент?
7. Как определить заряд электрона?
8. Какова методика проведения эксперимента?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №10**

### ***ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛЕНОИДА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАГНИТНОЙ ПОСТОЯННОЙ $\mu_0$***

**Цель работы.** Изучить магнитное поле длинного соленоида и определить магнитную постоянную  $\mu_0$ .

Опыт показывает, что электрические токи взаимодействуют между собой. Например, два тонких прямолинейных параллельных проводника, по которым текут токи (их называют прямыми токами), притягиваются друг к другу, если токи в них имеют одинаковое направление, и отталкиваются, если токи противоположны.

Взаимодействие токов осуществляется через поле, которое называют магнитным. Магнитное поле представляет собой вид материи, посредством которой осуществляются взаимодействия движущихся электрических

зарядов. Другими словами, всякие движущиеся заряды (электрические токи) возбуждают в окружающем их пространстве магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на *движущиеся в нем заряды* (токи) действуют силы. Магнитное поле, в отличие от электрического, не оказывает действия на покоящиеся заряды. Покоящиеся в данной системе отсчета заряды магнитное поле не создают.

Обнаружить магнитное поле можно по его силовому действию на движущиеся заряженные частицы, токи, намагниченные тела (магнитную стрелку).

Основной характеристикой магнитного поля является вектор магнитной индукции  $\vec{B}$ . Для магнитных полей, как и для электрических, справедлив принцип суперпозиции: магнитная индукция поля  $\vec{B}$ , создаваемого несколькими токами, равна векторной сумме индукций  $\vec{B}$  полей каждого из токов в отдельности:

$$\vec{B} = \sum^N \vec{B}_i, \quad (10.1)$$

где  $N$  - число токов.

Единицей магнитной индукции в СИ является тесла (Тл).

Магнитное поле можно изобразить графически с помощью линий магнитной индукции: касательные к ним показывают направление вектора  $\vec{B}$ , а его значение равно числу линий, проходящих через единичную перпендикулярную им площадку. Линии магнитной индукции всегда замкнуты, они не имеют начала и конца - такие поля называют *вихревыми*.

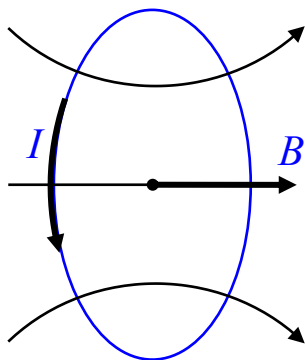


Рис. 10.1

Направление линий магнитной индукции определяется правилом правого винта (если поступательное движение правого винта совпадает с направлением тока, то направление вращения головки винта укажет направление линий магнитной индукции).

Для изучения магнитного поля можно взять плоский замкнутый контур с током и поместить его в исследуемую точку поля. Магнитное поле ориентирует такой свободный контур с током (как и магнитную стрелку) определенным образом, а именно: нормаль к площадке, ограниченной контуром, устанавливается параллельно вектору магнитной индукции (рис 10.1).

ции (рис 10.1).



Опыты по изучению магнитных полей, созданных токами, текущими по проводникам различной формы, показали, что:

1) во всех случаях индукция  $\vec{B}$  магнитного поля пропорциональна силе тока  $I$ ;

2) магнитная индукция зависит от формы и размеров проводника с током;

3) магнитная индукция  $\vec{B}$  в произвольной точке поля зависит от расположения этой точки по отношению к проводнику с током.

Био, Савар и Лаплас обобщили опыты и получили закон, который позволяет вычислить индукцию в каждой точке поля, создаваемого током, текущим по проводнику любой формы:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I[d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}, \quad (10.2)$$

где  $I$  – сила тока;

$I d\vec{l}$  – вектор, совпадающий с элементарным участком проводника длины  $dl$  и направленный по направлению тока (его называют элементом тока);

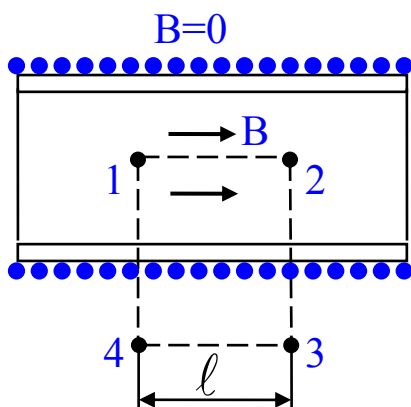
$\vec{r}$  – вектор, проведенный от элемента тока  $I d\vec{l}$  в ту точку, в которой определяется индукция  $d\vec{B}$ ;  $r$  – модуль этого вектора.

Направление вектора  $d\vec{B}$  находят по правилу правого винта.

Для расчета магнитных полей используют также теорему о циркуляции вектора индукции  $\vec{B}$ , которая для вакуума формулируется так: циркуляция вектора индукции магнитного поля по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной  $\mu_0$  на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром, т.е.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k \quad (10.3)$$

где  $N$  – число токов.



Применим теорему о циркуляции вектора  $\vec{B}$  для определения магнитного поля внутри соленоида.

Пусть ток  $I$  течет по проводнику, намотанному на поверхность цилиндра. Такой обтекаемый ток цилиндры называют соленоидом. На рисунке 10.2 изображен соленоид в разрезе, голубые кружки – сечения витков провода, по ко-

Рис. 10.2

тому течет ток. Пусть на единицу длины соленоида приходится  $n$  витков проводника. Если шаг винтовой линии (расстояние между двумя близлежащими витками) достаточно мал, то каждый виток соленоида можно приближенно заменить замкнутым витком. Опыт показывает, что чем длиннее соленоид, тем меньше индукция  $B$  снаружи.

Для бесконечно длинного соленоида ( $l \gg r$ ,  $l$  – длина соленоида,  $r$  – радиус витка), индукция снаружи соленоида отсутствует вообще, а внутри соленоида линии индукции направлены вдоль его оси – поле однородно (рис.10.2).

Учитывая, что внутри соленоида  $B = \text{const}$ , из (10.3) получим выражение для магнитного поля внутри соленоида:

$$B = \frac{\mu_0 N I}{l} = \mu_0 n I \quad (10.4)$$

Вывод полученного результата дан в *Дополнении*.

Как отмечалось, экспериментально измерить магнитную индукцию можно по влиянию магнитного поля на помещенный в него проводник с током (зонд). В данной работе зонд реагирует на магнитное поле благодаря явлению электромагнитной индукции, которое было открыто Фараде-ем. Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре, не содержащем источника тока, при *изменении магнитного потока* через поверхность, ограниченную контуром, *возникает электрический ток*. Этот ток называли индукционным, а само явление – электромагнитной индукцией. Появление электрического тока свидетельствует о возникновении ЭДС (электродвижущей силы), которую и называют ЭДС индукции.

*Магнитным потоком*  $\Phi$  через поверхность площади  $S$  называют величину, равную произведению модуля вектора магнитной индукции  $\vec{B}$  на площадь  $S$  и на косинус угла  $\varphi$  между вектором  $\vec{B}$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности

$$\hat{O} = BS \cos \varphi \quad (10.5)$$

Единица магнитного потока – вебер ( $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot 1 \text{ м}^2$ ).

Закон электромагнитной индукции можно сформулировать так:

ЭДС индукции в замкнутом проводящем контуре пропорциональна скорости изменения магнитного потока через поверхность, опирающуюся на данный контур.

$$\varepsilon = - \frac{d\hat{O}}{dt} \quad (10.6)$$

Знак минус в этой формуле отражает соответствие направления индукционного тока правилу Ленца. Формула (10.6) справедлива для всех возможных случаев изменения магнитного потока. При изменении магнитно-

го потока в катушке, состоящей из  $N$  одинаковых витков провода, общая ЭДС индукции в  $N$  раз больше ЭДС индукции в одиночном контуре, т.е.:

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (10.7)$$

Природа ЭДС индукции была раскрыта Максвеллом. Он показал, что любое переменное во времени магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве электрическое поле. Это поле и является причиной появления в проводнике индукционного тока. Наличие проводника лишь помогает выявить это электрическое поле. Электрическое поле, возбуждаемое переменным магнитным полем, не связано с зарядами и имеет замкнутые линии напряженности вектора  $\vec{E}$ , т.е. является вихревым (в отличие от электростатического поля, созданного зарядами).

Из (10.5) следует, что поскольку магнитная индукция пропорциональна току, то и поток  $\Phi$  также будет пропорционален силе тока  $I$

$$\Phi = LI \quad (10.8)$$

где  $L$  – индуктивность контура – величина, зависящая от формы контура, его размеров и магнитных свойств среды ( $\mu$ ). Единица индуктивности – генри ( $1\text{Гн} = 1\text{Вбс}/1\text{А}$ ).

Индуктивность  $L$  соленоида, длина которого  $l$ , а число витков  $N$ , каждый из которых ограничивает площадь  $S$ , и имеющего сердечник (помещенный внутрь соленоида ферромагнетик с магнитной проницаемостью  $\mu$ ) равна

$$L = \mu_0 \mu n^2 V, \quad (10.9)$$

где  $V$  – объем соленоида;

$n$  – число витков, приходящихся на единицу длины соленоида – плотность витков.

Если по соленоиду пропускать переменный ток, то созданное им внутри соленоида магнитное поле также будет переменным

$$B = B_m \cos \omega t$$

Если теперь поместить в него замкнутый проводящий контур – зонд в виде маленькой катушки, то в этой катушке будет возникать ЭДС индукции, которую можно измерить вольтметром

$$\begin{aligned} \varepsilon &= -N_1 \frac{d\Phi}{dt} = -N_1 S \frac{dB}{dt} \\ \varepsilon &= N_1 S \omega B_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (10.10)$$

где  $\omega$  – циклическая частота;  $S$  – площадь сечения катушки; число витков катушки  $N_1$ .

При измерении напряжения прибором с большим входным сопротивлением можно считать, что измеряемое прибором напряжение  $U$  равно  $\varepsilon$ , т.е.

$$\varepsilon = U = U_m \sin \omega t$$

Тогда из формулы (10.10) с учетом, что  $\omega = 2\pi\nu$ , следует:

$$B_m = \frac{U_m}{N_1 S 2\pi\nu} = 3.19 \cdot 10^{-2} \left( \frac{\text{Тл}}{\text{В}} \right) U_m \quad (10.11)$$

где  $U_m$  - амплитудное значение напряжения,  $\nu = 50$  Гц.

## **Выполнение работы**

### **Описание лабораторной установки**

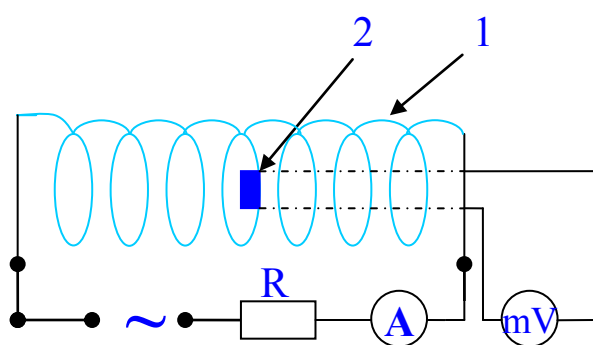


Рис. 10.3

Схема установки представлена на рисунке 10.3. Соленоид (1) имеет длину  $l=0,43$  м, диаметр 50мм и число витков  $N=200$ . Для измерения магнитной индукции используется зонд (2), представляющий собой катушку диаметром  $d=9,2$  мм, а число ее витков  $N_1=1500$ .

### **Задание 1**

Снять зависимость индукции  $B$  в центре соленоида от силы тока  $I$ , протекающего по обмотке соленоида. Для этого соберите схему рис.10.3.

Установите зонд в центре соленоида. Изменяя силу тока  $I$ , проходящего через соленоид, провести измерения значений напряжения  $U_{\text{эф}}$  с помощью милливольтметра ( $mV$ ). Данные измерений силы тока и напряжения занесите в таблицу.

Используя формулу (10.11), рассчитайте индукцию магнитного поля в центре соленоида в зависимости от силы тока  $I$  ( $U_m = U_{\text{эф}} \sqrt{2}$ ). Результаты расчетов занесите в таблицу. Постройте зависимость  $B=B(I)$ .

### **Задание 2**

Из полученной зависимости  $B=B(I)$ , задание 1, определить коэффициент пропорциональности  $\alpha$  между  $B$  и  $nI$ :

$$\alpha = \frac{B}{nI}$$

сравнить полученное значение  $\alpha$  с постоянной  $\mu_0$  (см. формулу 10.4).

### Задание 3

Снять зависимость индукции  $B(l)$  соленоида от положения зонда на оси соленоида.

Установить определенное значение тока в цепи. Перемещая зонд вдоль оси соленоида (шаг 1 см) провести измерения напряжения  $U_{\text{эф}}$  с помощью милливольтметра. Используя формулы 10.4 и 10.11, определить индукцию магнитного поля для всех положений зонда на оси соленоида.

Результаты измерений и расчетов занести в таблицу. Построить график зависимости  $B=B(l)$ , отложив на оси абсцисс расстояние  $l$ . Сделать вывод об однородности поля внутри соленоида.

### Дополнение

#### Расчет индукции магнитного поля, созданного длинным соленоидом.

Для определения магнитной индукции  $B$  поля, созданного током, протекающим по обмотке соленоида воспользуемся теоремой о циркуляции (10.10). Еще раз обратим внимание, что магнитное поле вне бесконечно длинного соленоида равно нулю, а внутри соленоида оно однородно – линии магнитной индукции параллельны (рис.10.3). Согласно (10.10) циркуляция вектора  $B$  равна интегралу по замкнутому контуру, в качестве которого выберем контур 1-2-3-4 на рисунке 10.2.

Тогда интеграл по замкнутому контуру распадается на сумму интегралов по сторонам этого контура. Интеграл на участке 3-4 равен нулю, поскольку  $B=0$  в этой области. Интегралы на участках 2-3 и 4-1 также равны нулю. Действительно, в подынтегральном выражении стоит скалярное произведение векторов

$(Bdl) = Bdl \cos \alpha$ , где  $\alpha$  – угол между  $B$  и  $dl$ , косинус которого на указанных участках равен нулю, поскольку векторы  $B$  и  $dl$  перпендикулярны. На участке 1-2 векторы  $B$  и  $dl$  параллельны поэтому  $\cos \alpha = 1$  и  $(Bdl) = Bdl$ . Таким образом окончательно получаем, что циркуляция вектора  $B$  по выбранному контуру равна:

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^N I_k, \quad (10.23)$$

где  $l$  – длина стороны 1-2.

В правой части формулы (10.23) стоит сумма токов, охватываемых контуром, то есть в нашем случае – число витков, укладываемых на длине  $l$ . Если плотность витков равна  $n$  и по каждому из них течет ток  $I$ , то сумма токов будет равна  $nIl$ .

Тогда (10.10) можно переписать в виде

$$Bl = \mu_0 n l I \quad (10.24)$$

Откуда окончательно получаем значение вектора магнитной индукции поля соленоида

$$B = \mu_0 n I \quad (10.25)$$

### **Контрольные вопросы**

1. Схема установки и порядок выполнения работы.
2. Как создаются и обнаруживаются магнитные поля? Индукция магнитного поля, единицы измерения. Линии магнитной индукции. Принцип суперпозиции магнитных полей.
3. Явление электромагнитной индукции.
4. \* Выведите формулу для индукции магнитного поля бесконечно длинного соленоида. Выведите формулу (10.11).
5. Дайте определение магнитного потока. Сформулируйте закон электромагнитной индукции. Как направлен индукционный ток?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №11**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ**

**Цель работы.** Ознакомление с элементами земного магнетизма и измерение горизонтальной составляющей индукции магнитного поля Земли с помощью тангенс – гальванометра.

Земля представляет собой гигантский магнит. Магнитная ось наклонена относительно географической и координаты магнитных полюсов не совпадают с географическими.

Современные теории не дают исчерпывающего описания природы земного магнетизма, тем не менее, знание распределения земного поля и его аномалий имеет большое значение для решения ряда географических и геологических проблем. Наблюдаемые на поверхности Земли неоднородности магнитного поля, позволяют производить разведку полезных ископаемых, обнаруживать большие скопления магнитных руд. Поскольку залежи ферромагнитных пород часто связаны с месторождениями других полезных ископаемых, магнитная разведка применяется для поиска нефти, угля, полиметаллических руд.

Основными методами в изучении магнитного поля Земли являются непосредственные измерения характеристик земного магнетизма, которые носят название магнитных съемок и производятся в постоянно действующем

щих магнитных обсерваториях, находящихся в различных пунктах земного шара.

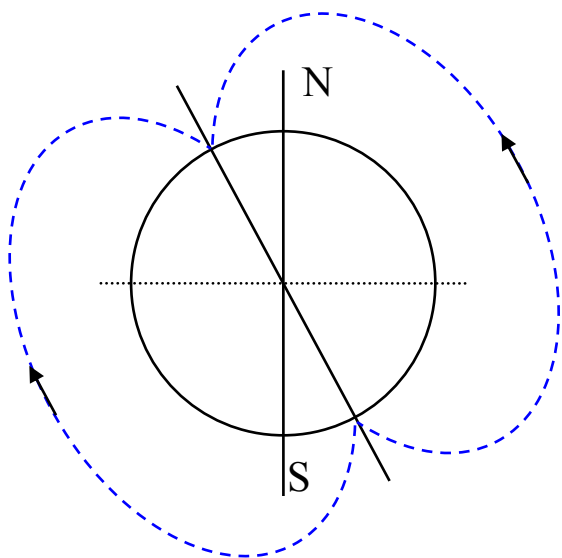


Рис. 11.1

Характеристикой магнитного поля Земли, как и всякого магнитного поля, служит индукция поля  $\vec{B}$ . Силовые линии магнитного поля Земли изображены на рис 11.1. Вектор магнитной индукции направлен по касательной к силовой линии в каждой точке. Для разложения вектора  $\vec{B}$  на составляющие обычно принимают прямоугольную систему координат, в которой одну из осей (x) ориентируют по направлению географического меридиана, а вторую (y) по направлению параллели, при этом положительным считается

направление оси (x) к северу, а оси (y) к востоку. Третья ось (z) в таком случае принимает вертикальное положение, и направление ее выбирают сверху вниз (рис.11.2)

Поместим начало координат в точку, где происходит наблюдение над вектором индукции магнитного поля Земли, тогда вектор  $\vec{B}$  займет по отношению к выбранной системе координат некоторое положение

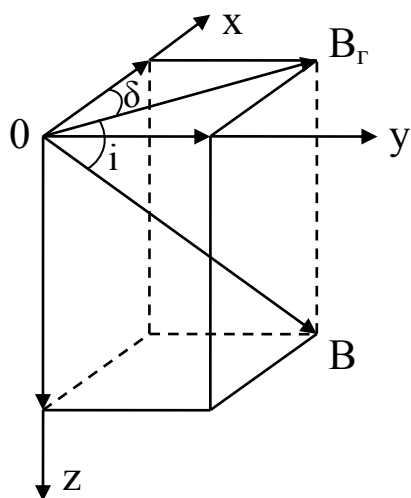


Рис. 11.2

(рис.11.2). Проекция  $\vec{B}$  на горизонтальную плоскость называется горизонтальной составляющей и обозначается  $B_r$ .

Угол  $i$  между  $\vec{B}_A$  и  $\vec{B}$  называется магнитным наклоном.

Вертикальная плоскость  $zOB$ , в которой лежит вектор  $\vec{B}$ , называется плоскостью магнитного меридиана. Угол между плоскостью географического и магнитного меридианов  $\delta$  называется магнитным склонением. Величины  $B_r$ ,  $\delta$  и  $i$  являются элементами земного магнетизма.

### Описание установки.

Основной частью лабораторной установки является тангенс гальванометр (ТГ), представляющий собой буссоль (компас с лимбом, разделенным на градусы), укрепленную внутри плоской вертикальной катушки (рис.11.3). Если размеры магнитной стрелки малы по сравнению с диаметром витков катушки, то можно считать, что стрелка установлена в ее центре. Катушка состоит из нескольких витков изолированной проволоки, концы которой выведены на клеммы (кк), через которые тангенс-гальванометр подключается к электрической цепи.

Экспериментальный метод определения горизонтальной составляющей индукции земного магнитного поля на сложении стрелки, свободной опоре Земли и магнитной индукции которого

Под действием Земли стрелка устанавливается по направлению  $B_{\Gamma}$ . Если в цепи катушки пропустить ток  $I$ , то индукция которой перпендикулярна к плоскости катушки, а численное значение определяется по формуле

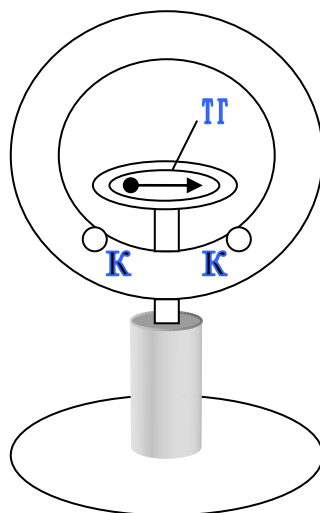


Рис. 11.3

индукции которого  $B_0$  известна. Если в цепи катушки пропустить ток  $I$ , то возникает магнитное поле, которое в центре кольца перпендикулярно направлению  $B_0$ .

Если в цепи катушки пропустить ток  $I$ , то возникает магнитное поле, которое в центре кольца перпендикулярно направлению  $B_0$ .

$$B_0 = \mu_0 \frac{I}{2r} n, \quad (11.1)$$

где  $r$  – радиус витка катушки;  $n$  – число витков в ней.

При этом магнитная стрелка повернется на угол  $\alpha$  и установится по направлению вектора индукции результирующего поля  $\vec{B} = \vec{B}_{\Gamma} + \vec{B}_0$  (рис 11.3).

$$\text{Тогда} \quad B_0 = B_{\Gamma} \operatorname{tg} \alpha \quad (11.2)$$

Таким образом, при включении поля  $B_0$  стрелка отклоняется на некоторый угол  $\alpha$ , который можно измерить. Зная силу тока и параметры катушки, величину  $B_0$  рассчитывают по формуле (11.1), а  $B_{\Gamma}$  можно вычислить по формуле (11.3), которая получается после подстановки (11.2) в (11.1)

$$B_{\Gamma} = \frac{\mu_0 I n}{2r \cdot \operatorname{tg} \alpha} \quad (11.3)$$



## Выполнение работы

1. Ознакомиться с электрической схемой установки. Электрическая схема установки представлена на рис. 11.4, где ТГ – тангенс-гальванометр,  $\varepsilon$  – источник постоянного тока, А – амперметр, R – реостат для регулирования силы тока в цепи.

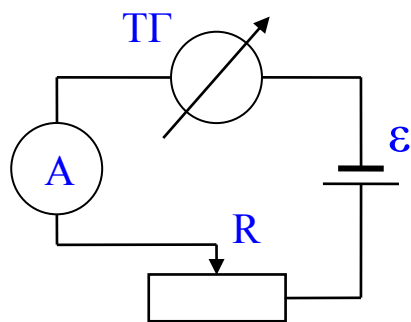


Рис. 14.2

2. Поворачивая основание тангенс-гальванометра, установить плоскость кругового тока по направлению магнитной стрелки. В этом случае плоскость кругового тока совпадает с магнитным меридианом.
3. Включить ток. При прохождении тока  $I$  будет создано магнитное поле  $B_0$ , направленное по оси кругового тока перпендикулярно магнитному полю Земли  $B_r$ . Магнитная стрелка компаса повернется в горизонтальной плоскости на угол  $\alpha$  и установится вдоль равнодействующей  $B_r$  этих двух полей.
4. Снять зависимость угла поворота стрелки от силы тока. Изменив направление тока на противоположное, повторить измерение угла. Данные занести в таблицу.

№	$I, A$	$\alpha$	$tg \alpha$	$B_r$
---	--------	----------	-------------	-------

5. Вычислить значение  $B_r$  по формуле (11.3) для каждой величины силы тока и соответствующего значения  $\alpha$ .
6. Найти среднее значение  $B_r$  и абсолютную погрешность результата  $\Delta B_r$ . Вычислить относительную погрешность результата.

## Контрольные вопросы

1. Какой вид имеют силовые линии магнитного поля Земли?
2. Как направлен вектор индукции магнитного поля по отношению к силовой линии?
3. Какие элементы земного магнетизма вы знаете?
4. Рассчитайте индукцию магнитного поля кругового тока в центре кольца.
5. Каковы устройство и принцип действия тангенс – гальванометра?
6. Почему следует ориентировать плоскость кругового тока в направлении магнитного меридиана?
7. Какова размерность  $B, I$ ?

# ОПТИКА

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 12

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ СВЕТА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ КОЛЕЦ НЬЮТОНА**

Согласно волновой теории, *свет представляет собой электромагнитные волны*, а именно распространяющиеся в пространстве колебания взаимосвязанных векторов напряженности электрического и магнитного полей.

При наложении волны могут взаимно усиливать или ослаблять друг друга, то есть происходит перераспределение светового потока в пространстве или интерференция. В результате в одних местах пространства возникают максимумы, а в других – минимумы интенсивности света. Необходимым условием интерференции волн является их когерентность, т.е. равенство их частот и постоянство во времени разности фаз.

Основная трудность в осуществлении явления интерференции света состоит в получении когерентных световых волн. Свет, испущенный обычными лампами, солнцем и другими естественными источниками, не является когерентным. Если имеется несколько обычных источников света, то интенсивность света в каждой точке пространства просто равна сумме интенсивностей, создаваемых в этой точке каждым источником в отдельности. Если, однако, источники когерентны, то положение в корне меняется.

Наложение когерентных волн приведет к тому, что в области наложения будет наблюдаться интерференционная картина – в некоторых точках будут наблюдаться усиления интенсивности – максимумы, а в других точках – минимумы. Будет ли в некоторой точке наблюдаться минимум или максимум зависит от разности хода волн. Разность  $\Delta = n_2 s_2 - n_1 s_1$  называют *оптической разностью хода волн*. Здесь  $n_1$  и  $n_2$  – показатели преломления сред, в которых распространяется каждая волна;  $s_1$  и  $s_2$  – расстояния (геометрические пути), пройденные соответственно первой и второй волнами до точки наблюдения. Если на оптической разности хода укладывается целое число длин волн (или, что то же самое, *четное* число длин полу-волн), т. е.

$$\Delta = m\lambda = 2m\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \quad (12.1)$$

то результирующее колебание имеет наибольшую амплитуду. В таких точках пространства наблюдают *максимумы* интенсивности. В точках

пространства, для которых

$$\Delta = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}, \quad m = 0, 1, 2, \dots; \quad (12.2)$$

т. е. на оптической разности хода укладывается *нечетное* число длин полуволн, наблюдают *минимумы* интенсивности. Таким образом, вследствие интерференции энергия результирующего колебательного процесса распределяется в пространстве неравномерно. Совокупность чередующихся максимумов и минимумов интенсивности образует интерференционную картину.

Разность фаз колебаний  $\delta$ , создаваемых в некоторой точке пространства двумя плоскими монохроматическими волнами, распространяющимися в средах с различными оптическими плотностями, связана с разностью хода соотношением

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda}(n_2 s_2 - n_1 s_1) = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta,$$

где  $\lambda$  – длина волны в вакууме.

В естественных условиях интерференционная картина может наблюдаться при сложении волн от одного источника, оптическая разность хода которых обусловлена отражением от различных поверхностей прозрачной пленки. Например, радужная интерференционная окраска наблюдается у мыльных пленок, тонких пленок нефти или бензина на поверхности воды и др.

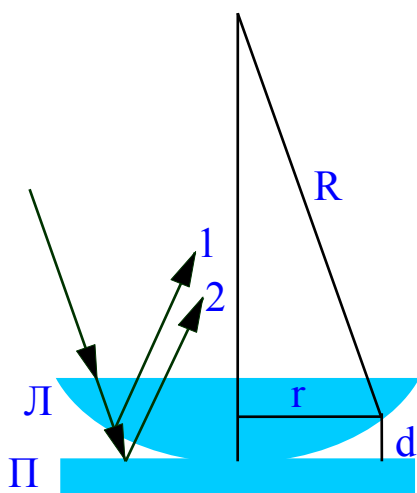


Рис. 12.1

В тонких пленках переменной толщины локализация интерференционной картины происходит на поверхности пленки, при этом все точки каждой интерференционной полосы соответствуют определенной толщине пленки; отсюда название интерференционной картины – полосы равной толщины.

Частным случаем такого рода интерференции являются кольца Ньютона. В работе они наблюдаются при отражении света от соприкасающихся друг с другом плоскопараллельной стеклянной пластины П и плосковыпуклой линзы Л с большим радиусом кривизны  $R$  (рис. 12.1). Роль тонкой пленки играет воздушная прослойка между пластинкой и линзой, постепенно утолщающаяся от

точки их соприкосновения к краям.

В эксперименте свет на эту систему направляют вертикально сверху (на рисунке падающий на линзу луч направлен на линзу не вертикально, а под углом для наглядности; не изображено преломление лучей на границах раздела сред воздух-стекло). Каждый луч, дойдя до верхней границы воздушной прослойки (нижней поверхности линзы Л), частично отразится (луч 1), частично войдет в нее. Дойдя до нижней границы прослойки (верхней поверхности пластины П), луч снова частично отразится от нее (луч 2). Отражения от других поверхностей не рассматриваются, так как из-за большой толщины пластины и линзы интерференция для них не наблюдается.

Лучи 1 и 2, образовавшиеся из одного и того же падающего луча при отражении от верхней и нижней границ воздушной прослойки, когерентны и при вертикальном падении света идут в одном направлении, так как угол, образованный воздушным “клином”, мал.

Оптическая разность хода лучей 1 и 2 определяется удвоенной толщиной воздушной прослойки  $d$ , которую второй луч проходит в прямом и обратном направлениях, а кроме того, потерей половины длины волны при отражении от стеклянной пластины на нижней границе воздушной прослойки.

Таким образом, учитывая, что для воздуха показатель преломления  $n$  близок к 1, оптическая разность хода лучей 1 и 2 будет равна

$$\Delta = 2d - \frac{\lambda}{2}.$$

Слагаемое  $\lambda/2$  отображает изменение фазы волны на  $\pi$  при отражении от оптически более плотной среды (“потерю полуволны”). Видно, что оптическая разность хода для волн с одинаковой длиной волны определяется только толщиной воздушной прослойки  $d$ , поэтому она (разность) одинакова для всех волн, отраженных на одинаковом расстоянии от точки соприкосновения линзы и пластины. Вследствие этого интерференционная картина имеет вид концентрических колец с центром в точке соприкосновения пластинки и линзы. В центре картины, где  $d \approx 0$ , наблюдают темное пятно, что соответствует разности хода отраженных волн, равной  $\lambda/2$ .

Радиусы темных и светлых колец определяются из условий интерференции.

Для тех толщин  $d$ , для которых

$$2d - \frac{\lambda}{2} = 2m \frac{\lambda}{2}, \quad (12.3)$$

выполняется условие максимума (12.1). Для тех же, для которых

$$2d \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2}, \quad (12.4)$$

выполняется условие минимума (12.2).

Толщину воздушной прослойки можно связать с радиусом кривизны линзы и радиусом соответствующего темного кольца. Из рис. 12.1 видно, что

$$R^2 = (R-d)^2 + r^2 = R^2 - 2Rd + d^2 + r^2.$$

Поскольку  $d$  мало,  $d^2 \ll 2Rd$ , им можно пренебречь, тогда

$$d = \frac{r_m^2}{2R}. \quad (12.5)$$

Подставляя (12.5) в (12.3), получим для радиусов темных колец:

$$r_m = \sqrt{mR\lambda}.$$

Измерив радиус  $m$ -го темного кольца и зная длину волны падающего света  $\lambda$ , можно определить радиус кривизны линзы:

$$R = \frac{r_m^2}{m\lambda}.$$

Результат будет более точным, если измерить радиус не одного, а двух темных (или светлых) колец. В этом случае радиус кривизны линзы определяется формулой

$$R = \frac{r_m^2 - r_n^2}{(m-n)\lambda}, \quad (12.6)$$

где  $r_m$  и  $r_n$  – радиусы,  $m$  и  $n$  – номера темных колец соответственно.

### **Выполнение работы**

**Цель работы.** В данной работе требуется определить радиус кривизны стеклянной линзы  $R$ , длину волны света  $\lambda$ , пропускаемого светофильтром, и толщину воздушного зазора  $d$ .

**Описание установки.** Источником света служит обычная лампа накаливания, свет от которой пропускается через светофильтр. Интерференционная картина – кольца Ньютона – исследуется с помощью микроскопа. Свет от лампы, пройдя через светофильтр и диафрагму, попадает на полупрозрачное зеркало, укрепленное перед объективом микроскопа. Увеличение микроскопа и положение зеркала с помощью специальных винтов подбираются таким образом, чтобы интерференционная картина полностью помещалась в поле зрения микроскопа и яркость образующихся колец была максимальной.

#### **Ход работы.**

1. Измерить диаметры нескольких темных колец для красного и зеле-

- ного светофильтров с помощью микроскопа.
2. Зная длину волны, пропускаемой красным светофильтром ( $\lambda=656\text{нм}$ ) и, используя соотношение (12.6), определить радиус кривизны линзы  $R$ .
  3. По вычисленному значению радиуса кривизны линзы рассчитать длину световой волны, пропускаемой зеленым светофильтром.
  4. Воспользовавшись соотношением (12.5), вычислить толщину воздушного зазора в том месте, где наблюдается кольцо с номером  $m$  (для любого из светофильтров).

### **Контрольные вопросы**

1. В чем заключается явление интерференции?
2. Какие волны называются когерентными?
3. При каких условиях наблюдаются минимумы и максимумы интерференционной картины?
4. Объясните возникновение колец Ньютона.
5. Приведите примеры интерференции в тонких пленках, наблюдающиеся в природе. Объясните эти явления.

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13**

### **ИЗУЧЕНИЕ ДИФРАКЦИИ СВЕТА С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА**

Характерной особенностью распространения любых волн является их способность огибать препятствия. Совокупность явлений, наблюдаемых при распространении волн в среде с резкими неоднородностями, называют дифракцией.

Дифракцией света объясняется отклонение от законов геометрической оптики. Например, вблизи границы геометрической тени появляются чередующиеся светлые и темные полосы – дифракционная картина – результат перераспределения светового потока в пространстве

Расчет интенсивности дифракционной картины осуществляют на основе принципа Гюйгенса – Френеля – малые элементы волновой поверхности являются источниками вторичных когерентных волн, амплитуды которых пропорциональны площади элемента; тогда амплитуда колебаний в любой точке пространства определяется интерференцией таких вторичных волн.

Дифракцию света можно наблюдать с помощью дифракционной решетки.

Дифракционная решетка – это пластинка из прозрачного материала, на которую нанесено большое число параллельных штрихов. Пропуская

монохроматический свет через такую систему щелей, на экране можно наблюдать дифракционную картину – яркие максимумы, разделенные темными промежутками – минимумами.

Условие наблюдения главных максимумов при нормальном падении света на дифракционную решетку имеет вид

$$d \sin \varphi = \pm k \lambda, \quad (13.1)$$

где  $d$  – период решетки – расстояние между соседними щелями;  $\varphi$  – угол отклонения луча от первоначального направления (угол дифракции);  $\lambda$  – длина волны падающего на решетку света;  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$  – порядок (номер) максимума.

При падении на решетку белого света происходит его разложение в спектр, поскольку согласно соотношению (13.1) каждой длине волны отвечают определенный угол дифракции.

## **Выполнение работы**

### **Описание установки.**

В работе изучение дифракции проводится с использованием дифракционной решетки (ДР) и гелий-неонового лазера – источника монохроматического когерентного излучения (рис 13.1).

**Цель работы.** Определить длину волны гелий-неонового лазера, а также размеры препятствий, на которых происходит дифракция – период дифракционной решетки (промежуток между серединами соседних щелей) и толщину нити.

### **Ход работы.**

1. С помощью дифракционной решетки ( $d = 0,01 \text{ мм}$ ) определить длину волны лазерного излучения. Для этого, установив решетку на расстоянии  $l = 0,5\text{-}1 \text{ м}$  от экрана, получить дифракционную картину и измерить расстояние  $x$  между соседними главными максимумами интенсивности. По формуле (13.1) рассчитать длину волны, излучаемую лазером, считая  $\sin \varphi = x/l$ , для  $k = l$ .

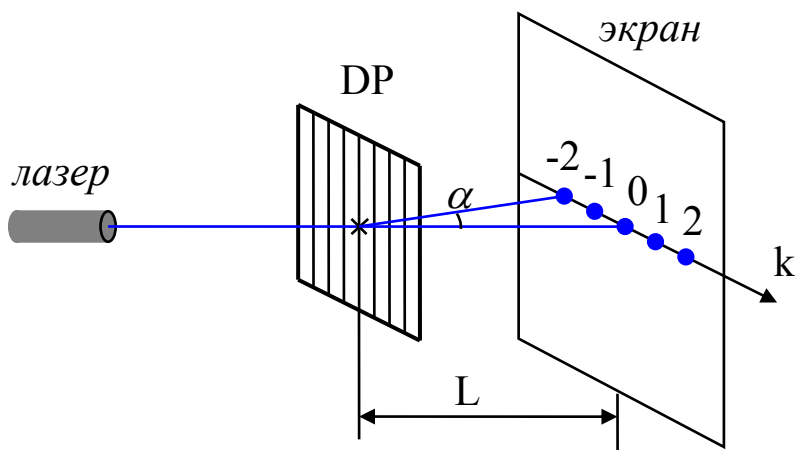


Рис. 13.1

2. Дифракция на двумерной плоской решетке. Установить вторую решетку за первой, расположив ее штрихи перпендикулярно штрихам первой решетки. Рассчитать период второй решетки по известной длине волны падающего света и измеренным расстояниям между максимумами на экране.

3. Измерить диаметр тонкой нити  $b$ . Для этого, изменяя расстояние между нитью и экраном, подобрать такое положение нити, чтобы на экране наблюдалась дифракция Фраунгофера. По формуле

$$\sin \varphi = \frac{2\lambda}{b},$$

определяющей угловую ширину центрального максимума, рассчитать диаметр нити  $b$ . Учесть, что при малых углах

$$\sin \varphi = \operatorname{tg} \varphi = \frac{\Delta x}{l},$$

где  $\Delta x$  – ширина центрального максимума,  $l$  – расстояние от нити до экрана.

### **Контрольные вопросы**

1. Что понимают под дифракцией света?
2. Объясните суть принципа Гюйгенса–Френеля.
3. Как можно определить длину световой волны с помощью дифракционной решетки?
4. Дифракционная решетка как спектральный прибор.
5. Что такое лазер? Назовите особенности лазерного излучения.



# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №14

## РАДИАЦИОННЫЙ ТЕПЛООБМЕН.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОСТОЯННОЙ СТЕФАНА-БОЛЬЦМАНА

Радиационный теплообмен – процесс передачи энергии от наиболее нагретого тела к менее нагретому путем излучения и поглощения этими телами электромагнитных волн (радиации). *Электромагнитная волна* – распространяющееся в пространстве переменное электромагнитное поле, Другими словами, в электромагнитной волне происходят колебания электрического (**E**) и магнитного (**B**) поля. Основные характеристики волн – длина волны, частота, скорость, интенсивность (квадрат амплитуды).

Излучение телами электромагнитных волн сопровождается потерей энергии и, следовательно, остыванием тела. Если же тело, поглощая падающее на него излучение от окружающих тел, получает количество тепла, компенсирующее убыль его энергии, то температура тела будет постоянной. Такой процесс излучения называют *равновесным*.

Охарактеризуем процессы излучения и поглощения количественно.

Величина, численно равная потоку энергии  $dE$ , излучаемой с единицы поверхности тела, – *энергетическая светимость*:

$$R = \frac{dE_{\text{изл}}}{dS} \quad (14.1)$$

Эта энергия, излучаемая телом, распределена по длинам волн – в каком-то диапазоне длин волн  $\lambda$  излучается больше энергии, в каком-то меньше. Поэтому вводят *излучательную способность тела*  $r_\lambda$  – энергетическую светимость в малом интервале длин волн  $d\lambda$ .

Тогда

$$R = \int_0^\infty r_\lambda d\lambda \quad (14.2)$$

*Поглощательная способность тела*  $a_\lambda$ , так же будет разной для электромагнитных волн с разной длиной волны:

$$a_\lambda = \frac{dE_{\text{погл}}}{dE} \quad (14.3)$$

Поглощательная способность показывает, какая доля излучения, падающего на единицу площади поверхности тела в диапазоне  $d\lambda$ , поглощается им в единицу времени. Остальная часть падающего на тело излучения рассеивается и отражается, а также преломляется (для прозрачных тел).

Излучательная и поглощательная способности тела зависят от частоты излучения (радиации), температуры, химического состава и состояния поверхности.

Тело, которое при любых температурах поглощает весь падающий на него свет, называется *абсолютно черным телом*. Для него,  $a_\lambda = 1$ . Для большинства тел  $a_\lambda < 1$ .

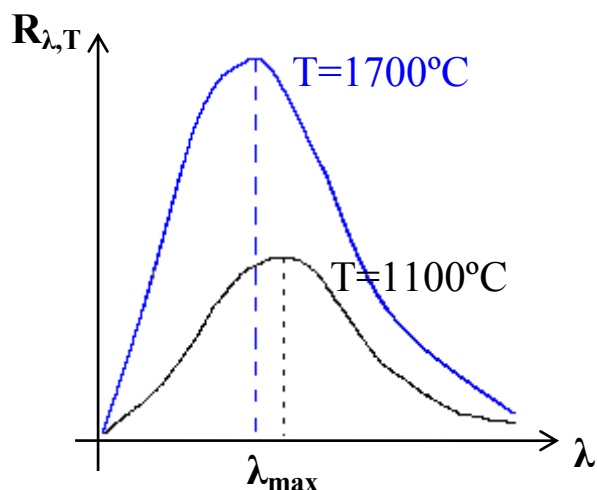


Рис. 14.1

Зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины волны приведена на рисунке (14.1).

М. Планком была выдвинута гипотеза о том, что излучение электромагнитных волн осуществляется порциями энергии – квантами. Энергия кванта  $\varepsilon$  связана с частотой  $\nu$  электромагнитной волны  $\varepsilon = h\nu$ .

На основе этой гипотезы удалось описать зависимость излучательной способности абсолютно черного тела от длины

волны аналитически (формула Планка):

$$r_{\lambda,T} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \quad (14.4)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $h$  – постоянная Планка.

Особенности этой зависимости отражены в *законах излучения абсолютно черного тела*.

**Закон смещения Вина:** Длина волны  $\lambda_{\text{max}}$ , соответствующая максимуму излучательной способности  $r_\lambda$ , обратно пропорциональна абсолютной температуре тела (рис 14.1):

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{\hat{a}}{T} \quad (14.5)$$

Это означает, что для комнатных температур ( $T = 300 \text{ K}$ ) максимум излучения тел приходится на инфракрасную область, т.е. лежит вне видимого диапазона. По мере нагревания максимум смещается в видимую область (см. рис 14.1). Середина видимого спектра ( $\lambda_{\text{max}} = 577 \text{ нм}$ ) соответствует температуре  $T = 5000 \text{ K}$ . Следовательно, температура тел, которые мы видим светящимися, соответствует тысячам градусов.

**Закон Стефана – Больцмана:** интегральная энергетическая светимость абсолютно черного тела  $R$  пропорциональна четвертой степени абсолютной температуры:

$$R = \sigma \cdot T^4, \quad (14.6)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана – Больцмана.

На рисунке 14.1 интегральная энергетическая светимость соответствует площади под кривой  $r_\lambda(\lambda)$ .

### **Выполнение работы**

**Цель работы** – экспериментальное определение постоянной Стефана-Больцмана ( $\sigma$ ).

#### **Описание установки.**

Для вычисления  $\sigma$  с помощью формулы (14.6) необходимо знать излучательную способность  $R$  и температуру  $T$  нагретого тела, в качестве которого используется вольфрамовая пластинка, нагреваемая до высоких температур при пропускании через нее тока. Тогда по закону Джоуля – Ленца количество тепла, выделившегося в ней, будет равно

$$Q = IUt \quad (14.7)$$

где  $U$  – напряжение на пластинке,  $I$  – ток через пластинку,  $t$  – время.

Это тепло будет излучаться вольфрамовой пластинкой. Поток излучаемой энергии (энергетическая светимость) – количество энергии, излучаемое единицей поверхности в единицу времени будет равен:

$$R = \frac{IU}{S}, \quad (14.8)$$

где  $S$  – площадь пластинки.

Температура пластинки слишком велика, чтобы ее можно было измерять, приводя в тепловой контакт с жидкостным термометром либо термопарой. Поэтому для измерения  $T$  используют оптический пирометр (рис 14.2).

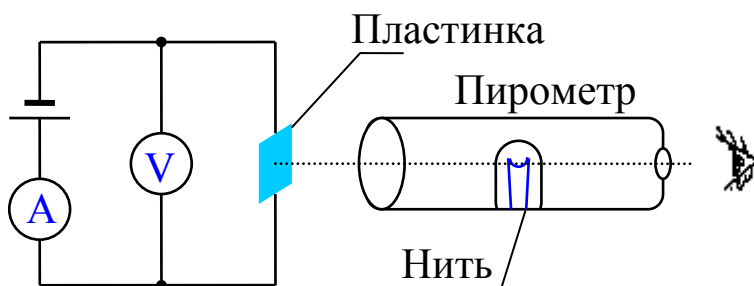


Рис. 14.2

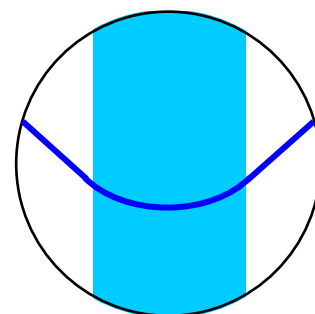


Рис. 14.3

Его применение основано на предположении, что если яркости двух тел (измеряемого и эталонного) равны, то равны и их температуры. Пирометр содержит эталонную нить накаливания, температуру которой, а значит, и яркость можно менять, регулируя ток  $I_0$ , протекающий через нее. В окуляр пирометра можно наблюдать свящуюся вольфрамовую пластинку и на ее фоне - эталонную нить (рис.14.3). Меняя ток через эталон, добиваются такого его значения, чтобы яркости образца и эталона совпали (в этот момент нить «исчезает» на фоне пластинки), при этом и температуры совпадают. Температуру эталона определяют по градуировке пирометра, измеряя ток  $I_0$  амперметром.

Однако, поскольку вольфрамовая пластинка не является абсолютно черным телом, измеренная по сравнению яркостей температура, будет для нее не абсолютной, а так называемой, яркостной  $T_{\text{я}}$ , связанной с истинной формулой

$$T = \frac{T_{\beta}}{1 + \frac{k\lambda}{2\pi hc} \ln a_{\lambda}}, \quad (14.9)$$

С учетом окружающей (комнатной) температуры  $T_{\text{к}}$  формула для расчета  $\sigma$  (14.6) будет выглядеть следующим образом:

$$R = \sigma(T_{\text{IE}}^4 - T_{\text{E}}^4) \quad (14.10)$$

Подставляя в (14.10) значения  $R$  и  $T$ , определенные по (14.8) и (14.9) соответственно, и, измерив комнатную температуру  $T_{\text{к}}$ , находят постоянную Стефана – Больцмана.

### **Ход работы**

1. Ознакомиться с измерительной установкой. Определить температуру в комнате  $T_{\text{к}}$ . Подготовить таблицу для записи данных измерений.
2. Включить питание в цепи вольфрамовой пластинки. Измерить ток  $I$  через нее и напряжение  $U$ .
3. Включить ток через эталонную нить накаливания и с помощью окуляра добиться четкого ее изображения на фоне пластинки.
4. Регулируя реостатом пирометра ток через эталонную нить, добиться ее исчезновения на фоне вольфрамовой пластинки. Записать соответствующее значение тока  $I_0$ .
5. По градуировочному графику пирометра, зная значение тока  $I_0$ , определить яркостную температуру  $T_{\text{я}}$ .
6. По формуле (14.9) рассчитать истинную температуру пластинки, а по формуле (14.8) ее излучательную способность.
7. С помощью формулы (14.10) определить постоянную Стефана – Больцмана.

## **Контрольные вопросы**

1. Что представляет собой электромагнитная волна? Назовите основные характеристики волн.
2. Что называют радиационным теплообменом?
3. Дайте определение излучательной и поглощательной способности. Какое тело называется абсолютно черным? Сформулируйте законы излучения абсолютно черного тела.
4. Что такое кванты? Энергия кванта. Формула Планка.
5. Оптическая пирометрия. Что измеряют пирометром?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 15**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЛИН ВОЛН СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЙ. КАЧЕСТВЕННЫЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ**

Свет – электромагнитные волны оптического диапазона – излучают атомы, молекулы или ионы источника света. *Спектром называется совокупность волн, которые излучаются источником.* Каждая волна имеет свою длину, и если она относится к видимому диапазону, глаз человека воспринимает ее как соответствующий цвет.

Сплошные спектры дают все тела согласно законам теплового излучения. Линейчатые спектры обусловлены электронными переходами, которые переводят атомы из состояния с высокой энергией (возбужденное состояние) в основное положение. При каждом таком переходе избыток энергии излучается в виде кванта света с конкретной длиной волны, которая зависит от энергии состояний, между которыми происходит спектральный переход (второй постулат Бора). Таким образом, линейчатые спектры дают возможность определить структуру энергетических состояний (уровней) атомов.

Поскольку атомы каждого химического элемента имеют индивидуальную структуру энергетических уровней, которая отличается от других, наблюдая спектры сплавов (или смесей), можно определить присутствие даже незначительного количества данного элемента.

Для того, что бы получить спектр вещества и исследовать его, необходимо:

во-первых заставить его атомы излучать свет, то есть перевести их в возбужденное состояние, что делается либо нагревом, либо созданием электрического разряда в парах вещества (электрическая дуга);

во-вторых пространственно разделить волны, которые излучаются, с помощью спектрального прибора (монохроматор, спектроскоп, спектрометр и др.).

### **Выполнение работы**

**Цель работы** – определить длины волн спектральных линий меди с помощью стилоскопа и провести спектральный анализ латуни на наличие цинка.

**Описание установки.** Спектральный прибор - стилоскоп (вариант спектроскопа), который позволяет разложить излучение в спектр и выполнять качественный и полуколичественный анализ сплавов. Его принципиальная оптическая схема приведена на рисунке 15.1. Источником света является электрическая дуга, которая образуется между двумя электродами – медным и сделанным из исследованного металла или сплава. Свет от нее проектируется на входящую щель стилоскопа  $\text{Щ}_1$ , после чего разлагается в спектр стеклянной призмой. Компоненты спектра наблюдаются в плоскости выходящей щели  $\text{Щ}_2$  через окуляр. Для определения длины волны стилоскоп имеет шкалу, нанесенную на винт (барaban), с помощью которого вращается призма и соответственная спектральная линия появляется в поле зрения окуляра.

Для того, что бы получить значения длины волны в метрах или в ангстремах ( $1 \text{ ангстрем} = 10^{-10} \text{ м}$ ), которые чаще используются в спектроскопии, шкалу спектроскопа нужно проградуировать, то есть поставить в соответствие делениям шкалы ( $k$ ) их значения в ангстремах. Для градуировки нужен эталон, в качестве которого в данной работе используют излучение ртути с известными длинами волн.

Призма раскладывает излучение в спектр благодаря явлению дисперсии света – зависимости показателя преломления  $n$  вещества (в данном случае – стекла) от длины волны. Даже если все компоненты света падают на призму под одним углом, каждой из них благодаря дисперсии будет соответствовать свой показатель преломления, а значит и свой угол преломления (рис. 15.1), что вытекает из закона преломления. Поскольку призма в отличие от плоской стеклянной пластины имеет преломляющий угол, при выходе из призмы волны разной длины оказываются пространственно разделенными. Большие углы преломления имеют синие и фиолетовые волны, меньшие – красные.

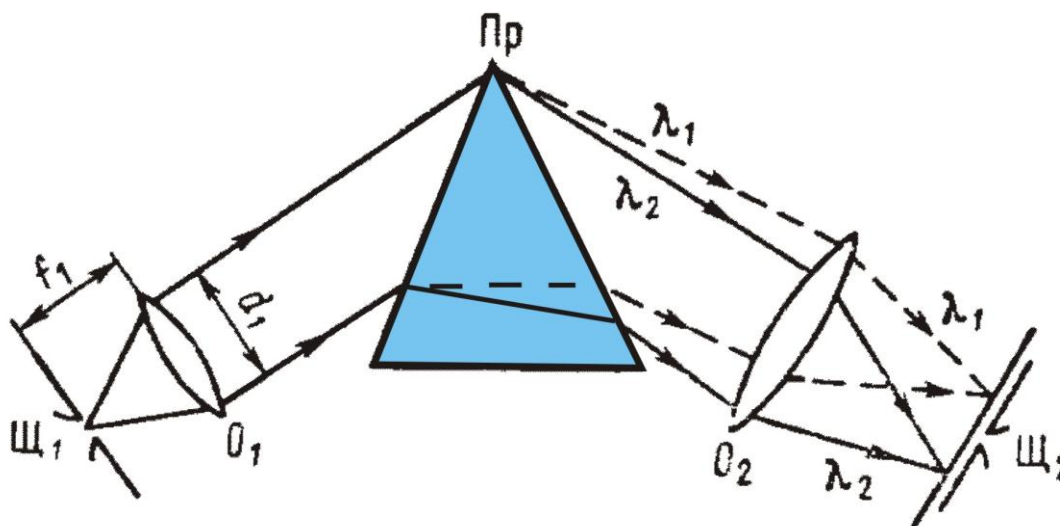


Рис. 15.1

### Ход работы

1. Проградуировать стилоскоп. В качестве эталона использовать ртутную лампу. Излучение ртути направить на входящую щель, наблюдать в окуляр линейчатый спектр ртути в желто-фиолетовом диапазоне (длина волн в ангстремах: 5791 и 5770 – желтый дублет; 5460 – зеленая; 4358 – синяя; 4077 и 4046 – фиолетовые). Поворот барабана поочередно подводить, начиная с желтых, спектральные линии до указателя в окуляре и записывать соответствующее деление шкалы барабана. По полученным данным построить градуированный график  $\lambda(k)$ .

2. Определить длины спектральных линий меди. Для этого включить электрическую дугу с двух медных электродов. Наблюдая спектр меди в окуляр стилоскопа, определить соответствующие деления шкалы барабана аналогично п.1. Пользуясь градуированным графиком, определить длины волн ярких линий меди на выбор.

3. Провести спектральный анализ латуни на наличие цинка. Латунь – медный сплав с примесями цинка. Один из электродов дуги заменить на латунный. Сравнить спектры меди и латуни в области 430-500нм. Выделить характерный для цинка триплет линий с длинами 467, 472, 480нм.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение сплошным и линейчатым спектрам излучения.
2. Каким образом и с какой целью проводят спектральный анализ? По каким параметрам спектра проводят качественный и количественный анализ?
3. Опишите принципиальную оптическую схему монохроматора.

4. Объясните, благодаря чему с помощью призмы можно получить спектр? Изобразите ход луча через призму.
5. С помощью чего градуируют спектральные приборы?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### *Основные физические константы*

Скорость света в вакууме, $c$	$2,998 \cdot 10^8$ м/с
Гравитационная стала, $G$	$6,672 \cdot 10^{-11}$ Нм <sup>2</sup> /кг
Стала Авогадро, $N_A$	$6,022 \cdot 10^{23}$ моль <sup>-1</sup>
Стандартный объем газа, $V_M$	$2,241 \cdot 10^{-2}$ м <sup>3</sup> /моль
Молярная газовая стала, $R$	$8,314$ Дж/моль·К
Стала Больцмана, $k$	$1,381 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд, $e$	$1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл
Удельный заряд электрона, $e/m_e$	$1,759 \cdot 10^{11}$ Кл/кг
Электрическая стала, $\epsilon_0$	$8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Стала Фарадея, $F$	$9,648 \cdot 10^4$ Кл/моль
Магнитная стала, $\mu_0$	$1,257 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Постоянная Планка, $h$	$6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Атомная единица массы (а. е. м.)	$1,6605655 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя электрона, $m_e$	$9,109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона, $m_p$	$1,6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона, $m_n$	$1,6749543 \cdot 10^{-27}$ кг

### *Погрешности измерений*

Все измерения характеризуются погрешностью.

Истинным значением некоторой величины  $X$  принято считать среднее арифметическое значение этой величины.

$$\langle x \rangle = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Абсолютные погрешности отдельных измерений

$$|\langle x \rangle - x_n| = \Delta x_n$$

Абсолютная погрешность измерения величины  $X$

$$\Delta x = \frac{\Delta x_1 + \Delta x_2 + \dots + \Delta x_n}{n}$$



Результат измерений записывают в виде:

$$x = \langle x \rangle \pm \Delta x$$

Относительная погрешность измерения  $\delta x$  – отношение абсолютной погрешности к истинному значению измеряемой величины – выражается в % или в долях

$$\delta x = \frac{|\Delta x|}{x_{\text{ист}}}$$

При косвенных измерениях величин значение физической величины  $F$  вычисляется по формуле

$$F = F(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – физические величины, измеренные непосредственно.

Абсолютная погрешность  $\Delta F$  косвенных измерений определяется по формуле

$$\Delta F = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x_1} |\Delta x_1|\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x_2} |\Delta x_2|\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial F}{\partial x_n} |\Delta x_n|\right)^2},$$

где  $\frac{\partial F}{\partial x_n}$  – частные производные функции  $F$  по переменной  $x_n$ ;

$\Delta x_n$  – абсолютные погрешности измерения величины  $x_n$ .

Для относительной погрешности

$$\delta F = \frac{\Delta F}{\langle F \rangle}$$

Относительную погрешность при косвенных измерениях, если расчетная формула удобна для логарифмирования, рассчитывают сначала логарифмируя, а потом дифференцируя полученное выражение.

Результат косвенного измерения также представляют в виде

$$F = \langle F \rangle \pm \Delta F$$

### ***Округление результатов измерений***

Значащими цифрами принято называть все цифры 1,2,3,...9, а также нуль, но только в тех случаях, если он стоит в середине или в конце числа, но не в начале. Например, числа 0,17; 0,017; 0,0017 имеют две значащие цифры. Число  $k = 1,38044$  имеет шесть значащих цифр.

1. Результат измерений нужно округлить так, чтобы оставшиеся цифры оканчивались тем же разрядом, что и значение его погрешности или, чтобы число знаков после запятой в результате совпадало с числом

знаков в погрешности. Количество знаков после запятой у измеренной величины и погрешности должно совпадать, например:

$$h = (2,75 \pm 0,03) \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

2. Если цифра первого из отбрасываемых разрядов меньше 5, то остающиеся цифры не меняются. Лишние цифры в целых числах заменяют нулями, а в десятичных дробях отбрасывают. Например, числовое значение результата измерения 65,5432 при погрешности в пределах  $\pm 0,04$  следует округлить до 65,54. Число 265245 при сохранении четырех значащих цифр должно быть округлено до 265200, а число 265,245 – до 265,2.

3. Если цифра старшего из отбрасываемых разрядов больше или равна пяти, но перед ней следуют отличные от нуля цифры, то последнюю оставляемую цифру увеличивают на единицу. Например, при сохранении трех значащих цифр, число 12582 округляют до 12600, а число 125,82 – до 126.

Пример.

Рассмотрим такой пример. Пусть требуется определить плотность вещества, масса и объем которого равны соответственно

$$m = 9,38 \pm 0,01 \text{ г}$$

$$V = 3,46 \pm 0,01 \text{ см}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{9,38}{3,46} = 2,71098 \text{ г/см}^3.$$

Но так как числа 9,38 и 3,46 – приближенные, то последние цифры в этих числах сомнительные (имеют погрешность). Тогда в рассмотренном примере вычисления необходимо вести до второго десятичного знака (округлить до сотых), а затем выразить плотность в системе СИ

$$\rho = 2,71 \text{ г/см}^3 = 2710 \text{ кг/м}^3.$$

Приближенные вычисления следует вести с соблюдением следующих правил.

1. При сложении и вычитании окончательный результат округляют так, чтобы он не имел значащих цифр в тех разрядах, которые отсутствуют хотя бы в одном из приближенных данных. Пример:

$$4,462 + 2,38 + 1,17273 + 1,0262 = 9,04093$$

Сумму следует округлить до сотых долей, т.е. принять ее равной 9,04.

2. При умножении округлять так, чтобы каждый из сомножителей содержал столько значащих цифр, сколько их имеет сомножитель с наименьшим числом таких цифр. Пример:

$$\text{вместо } 3,723 \cdot 2,4 \cdot 5,1846$$

$$\text{вычисляют } 3,7 \cdot 2,4 \cdot 5,2$$

В окончательном результате 46,176 оставляют такое число значащих цифр, которое имеется в сомножителях после их округления, т.е. 46,2.

3. При возведении в квадрат или куб следует в степени брать столько значащих цифр, сколько их имеется в основании степени. Пример:

$$1,32^2 = 1,74$$

4. При извлечении квадратного или кубического корня в результате нужно брать столько значащих цифр, сколько их имеется в подкоренном выражении. Пример:

$$\sqrt{1,17} = 1,08$$

5. При вычислении сложных выражений следует применять указанные правила в соответствии с производимыми действиями. Пример:

$$\frac{(3,2 + 17,062)}{5,4 \cdot 2,007} = 1,9$$

### ***Погрешности табличных величин и единичных измерений***

1. В качестве абсолютной погрешности табличной величины принимается пять единиц разряда, следующего за последней значащей цифрой. Например, если  $\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$ , то  $\Delta\rho = \pm 0,05 \text{ г/см}^3$ ; если  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ , то  $\Delta g = \pm 0,005 \text{ м/с}^2$ .

2. Если в расчетную формулу входят константы, например  $e=2,718...$ ,  $\sqrt{2} = 1,41...$ , то за погрешность принимается округленное значение отбрасываемой части числа.

3. За абсолютную погрешность при измерениях можно принимать половину цены наименьшего деления прибора. Например, если цена деления линейки 1 мм, то абсолютную погрешность следует брать 0,5 мм.

### ***Контрольные вопросы***

1. В каких основных единицах системы СИ следует выразить перечисленные ниже величины:

- длину улицы
- продолжительность суток
- массу слитка золота
- объем бассейна
- площадь территории Украины

2. Какие приставки, используемые в метрической системе, соответствуют следующим множителям:

$$1 \cdot 10^{-6} ; 0,1 ; 1 \cdot 10^9 ; 0,001 ; 1 \cdot 10^{-12} ; 0,00000001 ; 1 \cdot 10^{12} ?$$

3. Впишите эквивалентные величины:

4,5 м составляют ..... см

43 кг ..... мг

- 28 с ..... МКС  
 234 мг ..... КГ  
 68,2 см ..... КМ
4. Парсек – единица длины, применяемая в астрономии составляет  $3,08 \cdot 10^{12}$  км. Сколько метров содержится в микропарсеке?
5. Выполните указанные действия, округлите ответы до правильного числа значащих цифр:  
 $3,22 \cdot 0,17 =$   
 $1,987 : (3,46 \cdot 10^2) =$   
 $(12,3 + 0,092) : 8,3 =$   
 $15,67 + 0,8896 + 2,0 + 1,2 \cdot 10^2 =$   
 $0,0003 : 162 =$   
 $3,4 \cdot 2,668 : 1012 =$
6. Укажите число значащих цифр в каждой из следующих величин:  

43,55 –	5,67 · 10 <sup>3</sup> –
3 · 10 –	1300,08 –
0,571 –	2,7 · 10 <sup>-2</sup> –
6000000 –	0,02 · 10 <sup>6</sup> –
7. Вычислите абсолютную и относительную погрешности, если при измерении длины отрезка получили:  
 Н1 = 66,5; Н2 = 66,4; Н3 = 66,1; Н4 = 65,9.
8. Вычислите погрешность, с которой определяется длина окружности, если радиус  $R = 18,21 \pm 0,05$  м.
9. Определите погрешности плотности вещества при косвенных измерениях по заданной массе и объему (значение величин возьмите из примера, приведенного в тексте).

### **Греческий алфавит**

А α – альфа	Ν ν – ню
Β β – бета	Ξ ξ – кси
Γ γ – гамма	Ο ο – омикрон
Δ δ – дельта	Π π – пи
Ε ε – эпсилон	Ρ ρ – ро
Ζ ζ – зета	Σ σ – сигма
Η η – эта	Τ τ – тау
Θ θ – тета	Υ υ – ипсилон
Ι ι – йота	Φ φ – фи
Κ κ – капа	Χ χ – хи
Λ λ – лямбда	Ψ ψ – пси

### Литература

1. Савельев И.В. Курс физики :Учеб. : В 3-х т. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989.
2. Лабораторные занятия по физике : Учеб. пособие. / Под ред. Гольдина Л.Л. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1983. – 704 с.
3. Лабораторный практикум по физике: Учеб. пособие для студентов втузов. / Под ред. Ахматова А.С. – М. : Высшая школа, 1980. – 360 с.
4. Лабораторный практикум по физике : Учеб.пособие для студентов втузов. / Под ред. Барсукова К.А. и Уханова Ю.И. – М. : Высшая школа, 1988. – 351 с.
5. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике : Учеб. пособие. – 4-е изд. – М. : Высшая школа, 1981. – 496 с.
6. Физика : Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников / Сост. : А.Г. Андерс, В.Г. Борисенко, Е.М. Савченко, И.А. Таранова. – Харьков : ХНУ. – 2006. – 88 с.
7. Методические указания к лабораторным работам по физике (раздел «Электричество и магнетизм») для студентов / Сост. Кармазин В.В. , Нефедов Ю.И. –Харьков: ХИРЭ, 1991. -180с.